

ESTUDIO DE CORROSIÓN EN PIELES Y ESTRUCTURAS AERONÁUTICAS

MARÍA CAROLINA SERNA MOSQUERA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2007**

ESTUDIO DE CORROSIÓN EN PIELES Y ESTRUCTURAS AERONÁUTICAS

MARÍA CAROLINA SERNA MOSQUERA

Pasantía para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
JULIAN PORTOCARRERO HERMANN
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2007

Nota de Aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico

ING. JULIAN PORTOCARRERO HERMANN
Director

Santiago de Cali, 15 de Junio de 2007

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| RESUMEN | 9 |
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1. CORROSIÓN | 11 |
| 1.1. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA | 14 |
| 1.2. TEORÍA DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA | 15 |
| 1.2. FORMAS Y MECANISMOS DE LAS FALLAS POR CORROSIÓN | 20 |
| 2. ALUMINIOS | 33 |
| 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ALUMINIOS | 33 |
| 2.2. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ALUMINIO. | 39 |
| 3. CÁMARA AMBIENTAL | 43 |
| 3.1. SISTEMA DE SIMULACIÓN | 44 |
| 3.2 SISTEMA DE CONTROL | 47 |
| 3.3 PUESTA A PUNTO | 49 |
| 4. CASOS DE ESTUDIO SOBRE ANÁLISIS DE FALLAS CAUSADAS POR EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN COMPONENTES AERONÁUTICOS | 53 |
| 4.1 CASO No 1 | 54 |
| 4.2. CASO No 2 | 62 |
| EXÁMENES DE SUPERFICIE | 64 |
| 5. MANTENIMIENTO EN LA FAC | 68 |
| 5.1. CORROSIÓN EN LA FAC | 68 |
| 5.2. MODELO DE FICHA TÉCNICA DE ESTUDIO PREDICTIVO DE MANTENIMIENTO | 69 |
| 6. CONCLUSIONES | 73 |
| 7. RECOMENDACIONES | 74 |
| BIBLIOGRAFÍA | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Costos atribuidos a la corrosión metálica en E.E.U.U. | 12 |
| Figura 2. Árbol básico de fallas por corrosión. | 13 |
| Figura 3. Estudio de atribución de responsabilidades por fallas por corrosión. | 14 |
| Figura 4 .Corrosión atmosférica del hierro. | 16 |
| Figura 5. Regímenes de la corrosión atmosférica. | 19 |
| Figura 7. Productos formados por la corrosión de los metales. | 20 |
| Figura 8. Principales formas de corrosión. | 21 |
| Figura 9. Corrosión uniforme presentada en un proyectil. | 22 |
| Figura 10. Variaciones típicas de las picaduras. | 23 |
| Figura 11. Microambiente creado por crevice. | 24 |
| Figura 12. Aeronave Boeing 737 | 25 |
| Figura 13. Tipos de empalme utilizados en fuselajes. | 26 |
| Figura 14. Forma del crevice en la junta y volúmenes relativos de productos de la corrosión del aluminio. | 27 |
| Figura 15. Corrosión galvanica en remaches de aluminio. | 28 |
| Figura 16. Serie galvanica. | 29 |
| Figura 17. Factores que afectan la corrosión galvanica. | 30 |
| Figura 18. Corrosión galvanica de la estatua de la libertad. | 31 |
| Figura 19. Vista general de la cámara ambiental del CITA. | 43 |
| Figura 20. Bomba para vacío. | 44 |
| Figura 21. Compresor. | 45 |
| Figura 22. Resistencia tubular recta. | 45 |
| Figura 23. Vista del tanque y válvula aspersora. | 46 |
| Figura 24. Vista general del equipo humidificador. | 47 |
| Figura 25. Censor de Temperatura y Humedad Relativa. | 47 |
| Figura 26. Censor de Presión. | 48 |
| Figura 27. Panel de control. | 48 |
| Figura 28. Comunicación RS485. | 49 |
| Figura 29. Efecto de la temperatura. | 50 |
| Figura 30. Accidente octubre 4 de 1992 | 53 |
| Figura 31. Grietas en el tren de aterrizaje. | 55 |
| Figura 32. Grietas abiertas en partes 4 y 1. | 56 |
| Figura 33. Grieta abierta en parte 5 y daño mecánico en parte 3. | 56 |
| Figura 34. Parte 3 después de limpiar. | 56 |
| Figura 35. Área fisurada en Parte 2. | 57 |
| Figura 36. Centro del bulón. | 57 |
| Figura 37. Análisis de grietas en parte 2. | 58 |
| Figura 38. Ataque corrosivo en parte 6. | 58 |
| Figura 39. Grano estructural parte 6. | 59 |
| Figura 40. Grietas parte 5. | 60 |
| Figura 41. Corrosión Intragranular. | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 42. Grietas por esfuerzos corrosivos | 61 |
| Figura 43. Accesorio de la maquina que falló. | 63 |
| Figura 44. Componentes del accesorio. | 64 |
| Figura 45. Desgaste por frotamiento. | 64 |
| Figura 46. Evidencia del desgaste. | 65 |
| Figura 47. Examen de las puntas. | 65 |
| Figura 48. Helicóptero UH-60 BLACK HAWK | 68 |
| Figura 49. Corrosión en piezas. | 69 |
| Figura 50. Celdas lanzacohetes | 69 |

LISTA DE ECUACIONES

| | Pág. |
|-------------|-------------|
| Ecuación 1 | 13 |
| Ecuación 2. | 16 |
| Ecuación 3 | 17 |
| Ecuación 4 | 17 |
| Ecuación 5 | 17 |
| Ecuación 6 | 17 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Anexo 1. Manual de Operación cámara ambiental CITA. | 77 |
| Anexo 2. Paper | 89 |

RESUMEN

El proyecto de una cámara ambiental para el CITA tiene como base uno de los principales problemas del ingeniero de mantenimiento que es predecir donde y cuando pueden ocurrir las fallas y previniendo de esta forma la ocurrencia de estas, que podrían tener catastróficas consecuencias y daños mayores.

Uno de los grandes problemas al que se enfrenta el sector aeronáutico y en particular la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), es el de corrosión de sus componentes especialmente en pieles, estructuras y quincallería (tornillos, remaches, etc.) por efectos del medio ambiente al que están expuestos al recorrer el Territorio Nacional por las operaciones militares y otras actividades del desempeño de la FAC. Es importante resaltar, además que por efectos del conflicto armado se producen residuos de propergoles y otros componentes de la munición empleada los cuales presentan un elevado nivel corrosivo. Es importante resaltar la antigüedad que presentan las aeronaves con que cuenta la FAC, algunas de ellas poseen más de cincuenta (50) años de servicio; por lo cual presentan algunos problemas corrosivos acumulados por los años de operación. Por lo anteriormente mencionado se hace imprescindible la implementación de un programa de mantenimiento real ajustado a las condiciones actuales de operación y antigüedad del parque aeronáutico de la FAC, el cual se hace viable y real a través de pruebas desarrolladas en una cámara ambiental.

Factores como los anteriores generaron que el grupo investigativo del CITA desarrollará y colocará a disposición de la FAC una cámara ambiental como herramienta predictiva para el estudio de este problema.

La primera fase de este proyecto fue el diseño y construcción de la cámara, la segunda fase y tema de este trabajo es la investigación de temas relevantes (corrosión, aleaciones, mantenimiento), puesta a punto y verificación del adecuado funcionamiento de la máquina, además de la conformación de una base de datos como complemento ideal y una herramienta útil para la puesta en marcha de un programa de mantenimiento predictivo en la FAC; adicionalmente se desarrollo un manual de operación y mantenimiento de la cámara.

Es así como en esta segunda etapa del proyecto se logra entregar la máquina trabajando satisfactoriamente con la capacidad de simular la gran variedad de los ambientes del territorio nacional y con la característica de estar al alcance de cualquier técnico, operario o ingeniero que necesite de sus servicios gracias al manual, en el que se diseñó paso a paso el proceso operación, de una forma sencilla, tratando de no dejar ningún elemento de funcionamiento de esta por fuera.

INTRODUCCIÓN

El deterioramiento sufrido por los diferentes componentes de las aeronaves es un problema latente en la Fuerza Aérea Colombiana FAC, este no solo afecta la disponibilidad de la flota, sino también la seguridad de los tripulantes en las diferentes operaciones, lo que genera incertidumbre acerca de los planes actuales de mantenimiento, sobretodo de aquellas aeronaves que han superado su vida útil de diseño o que se acercan peligrosamente a este punto, como ocurre con la mayor parte de las aeronaves de la FAC, algunas de las cuales presentan más de cincuenta años de servicio.

Al contar la FAC con bases alrededor de todo el país, sus aeronaves no sólo son sometidas a las inclemencias del tiempo, sino a las diferentes condiciones climáticas afectadas por las variaciones de temperatura, presión, humedad y pH; lo cual afecta sus estructuras y pieles por fenómenos de **corrosión**.

Este efecto degenerativo es la razón de estudio del presente proyecto, basado en la implementación de una nueva herramienta, con la que se puede estudiar y analizar a través de ensayos bajo condiciones conocidas y reproducibles las causas y efectos de la corrosión en las diferentes elementos y materiales, permitiendo así tomar medidas predictivas, generando un aporte significativo a las prácticas actuales de mantenimiento en la FAC.

Es por la relevancia que tiene esta problemática actualmente que, el CITA (Centro de Investigación en Tecnología Aeronáutica), inicia en el año 2003 un proyecto de investigación enfocado a encontrar soluciones. El grupo de trabajo designado para esta labor esta conformado por docentes y practicantes de ingeniería mecánica tanto de la escuela militar como de otros centros educativos de la región.

En la primera etapa del proyecto se realizó el diseño y la construcción de una Cámara Ambiental, la segunda etapa que corresponde a este trabajo, realiza la parte de investigación, puesta a punto y verificación del adecuado funcionamiento de la cámara, además de la conformación de una base de datos complemento y herramienta útil para la puesta en marcha de un programa de mantenimiento predictivo de la FAC.

Con la finalización de este proyecto la Escuela Militar de Aviación EMAVI tendrá a su disposición una herramienta tecnológica propia para ponerse a la vanguardia en procedimientos de mantenimiento aeronáuticos y asegurar así la operación y disposición de la flota para las necesidades de nuestro País.

1. CORROSIÓN

La corrosión es el ataque destructivo que sufre todo material por la reacción de este con el medio ambiente que lo rodea, las serias consecuencias de los procesos corrosivos se han convertido hoy en día en un problema de significado mundial; todo ingeniero en su día a día se encuentra con la corrosión, esta forma de degradación es causa de cierre de plantas, desperdicio de recursos valiosos, pérdida y contaminación de productos, reducción de eficiencia, altos costos de mantenimiento, sobre costos del rediseño, entre otros; además de poner en peligro la seguridad e integridad de los operadores e inhibir el progreso tecnológico.

El multidisciplinario aspecto de los problemas acarreados por la corrosión, combinado con la distribuida responsabilidad asociada a cada uno de estos eventos, solo incrementa la complejidad del tema. El control de la corrosión es alcanzado por medio del reconocimiento y el entendimiento de los mecanismos que la causan, mediante el uso de materiales y diseños resistentes a la corrosión y la implementación de sistemas y tratamientos de protección.

El panorama hoy en día es preocupante para las grandes empresas, la industria y el gobierno, quienes para velar por sus intereses han establecido grupos y comités de investigación para ahondar en las causas de los hechos relacionados con la corrosión. Se ha encontrado en muchos de los casos que las responsabilidades están repartidas entre los fabricantes de los sistemas y sus usuarios. Los costos por los daños atribuidos a la corrosión están en el orden del 3% al 5% del producto interno bruto de los países industrializados. En la

Figura 1 se puede observar los costos atribuidos a la corrosión de metales en los Estados Unidos.

Como ejemplo de un daño catastrófico causado por efectos corrosivos a través de la historia se puede citar: La gran explosión de alcantarillas en México; En abril de 1992 en Guadalajara México la explosión de una red de alcantarillo, mato a 200 ciudadanos. Además de la fatalidad de los hechos una continua serie de ráfagas explosivas y hondas de choque continuaron con los daños a las estructuras de 1.600 edificaciones e hirieron a 1.500 personas más. Los costos de estos daños fueron estimados en 75 millones de dólares americanos, y se encontró que la responsabilidad estaba compartida.

Figura 1. Costos atribuidos a la corrosión metálica en E.E.U.U.

| | 1975 | 1995 |
|----------------------------------|--------|---------|
| All industries | | |
| Total (billions of 1995 dollars) | \$82.5 | \$296.0 |
| Avoidable | \$33.0 | \$104.0 |
| Avoidable | 40% | 35% |
| Motor vehicles | | |
| Total | \$31.4 | \$94.0 |
| Avoidable | \$23.1 | \$65.0 |
| Avoidable | 73% | 69% |
| Aircraft | | |
| Total | \$3.0 | \$13.0 |
| Avoidable | \$0.6 | \$3.0 |
| Avoidable | 20% | 23% |
| Other industries | | |
| Total | \$47.6 | \$189.0 |
| Avoidable | \$9.3 | \$36.0 |
| Avoidable | 19% | 19% |

Con la investigación posterior se le dio seguimiento a la pista que daba con la causa de la explosión de la alcantarilla, hasta llegar a la instalación de una pipa de agua por un contratista varios años antes del suceso, donde por errores procedimentales quedo una filtración de agua cayendo sobre una línea de combustible que se encontraba abajo. La subsiguiente corrosión en la tubería de gasolina se convirtió en una fuga de combustible dentro de las alcantarillas.

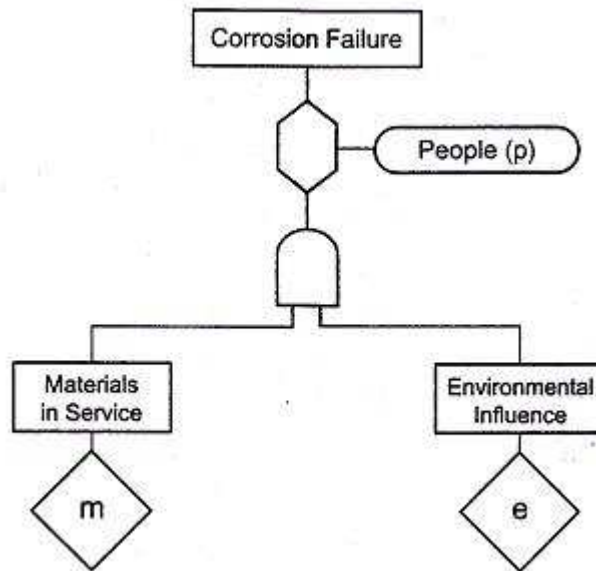
El fiscal general de México levanto cargos de homicidio por negligencia a cuatro funcionarios de PEMEX (Compañía Estatal de Petróleos de México), además de ser citados también tres representantes del sistema regional de alcantarillados y el alcalde de la ciudad.

Los costos y el caso citado anteriormente son pruebas de que la corrosión es un problema grande, y por ende la preocupación de conocerla, tratarla y prevenirla con las herramientas adecuadas.

Los efectos causados por la corrosión y que se traducen en grandes fallas que ocasionan desastres, podrían ser minimizados frecuentemente bajo el estricto control y monitoreo de los factores ambientales y humanos complementarios de los diseños en ingeniería. Todo sistema esta diseñado para que funcione acorde a las especificaciones técnicas del fabricante, aún así, se debe tener en cuenta una triple forma de interacción que se establece con complejas y variables imputaciones de parte de la gente (p), los materiales (m) y el medio ambiente (e). En un intento por entender esta forma de correlación de factores mecánicos, ambientales y humanos de una manera estructurada, se desarrollo el concepto de un árbol de fallas presentado en la Figura 2. Donde la consecuencia o el evento final, en este caso una falla por corrosión, puede ser

fácilmente resultado de la combinación de los tres elementos anteriormente mencionados.

Figura 2. Árbol básico de fallas por corrosión.



La representación el evento probable final (P_{sf}), puede ser evaluado por álgebra Booleana, como lo enuncia la

Ecuación 1; donde P_m y P_e son respectivamente la probabilidad de falla de los materiales y el medio ambiente; el factor p describe la influencia de la gente en la vida útil de cualquier sistema.

Ecuación 1

$$P_{sf} = P_m P_e \text{Factor } p$$

La justificación para incluir el elemento gente como un factor que inhibe o incrementa la falla o como un evento condicional para la misma es debido a que la corrosión por ser un proceso natural, su ocurrencia, no depende de la intervención del hombre, pero si este actúa lo hace a manera de catalizador.

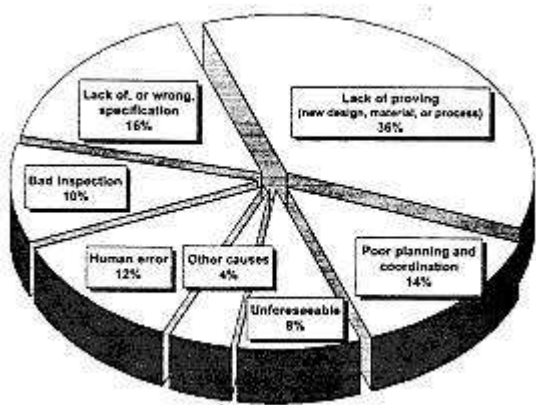
De este modo la ecuación indica una falla puramente mecánica cuando P_m es alta y P_e es bajo; la mayoría de los buenos diseños de sistemas en ingeniería para los cuales el P_e es aproximadamente cero (0), tienden a demostrar buenos niveles de confianza, esto da ha entender que los mas exitosos sistemas usualmente son aquellos en los cuales la influencia del medio ambiente es muy pequeña y continua a través del tiempo de servicio. En este orden de ideas cuando P_e se incrementa tiene una influencia significativa sobre

el Pfs, demostrando la mayor susceptibilidad a la ocurrencia a una falla por corrosión.

Minimizar el Pfs es a través del diseño es difícil sino imposible de lograr debido al gran numero de formas como Pm, Pe y factor p, pueden variar durante la vida útil del sistema.

Es tan importante este tema que hasta los diferentes tipos de personas que interactúan a lo largo de la vida útil del sistema y que pueden afectar el desempeño de este han sido claramente identificados como catalizadores de las fallas. El que lo diseñó, el que lo construyó, el que lo vendió, el que lo instaló, el usuario y el que hace el mantenimiento, como se aprecia en la Figura 3.

Figura 3. Estudio de atribución de responsabilidades por fallas por corrosión.



1.1. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica puede ser definida como el desgaste sufrido por los diferentes materiales al estar expuestos al aire y sus poluciones, este tipo de corrosión puede estar clasificada en: Seca, húmeda y mojada. Las dos ultimas están asociadas a la corrosión en presencia de una película electrolítica microscópica, además de otras capas también electrolíticas estas si visibles sobre las superficies.

Estos dos tipos de corrosión difieren, la película de capa húmeda crea un cierto nivel crítico de humedad a lo largo de toda su extensión debido a la absorción de moléculas de agua, mientras que, la película mojada es asociada con el punto de condensación (Rocío), caída del agua del océano, agua lluvia y otras formas de salpicadura de agua.

Con relación a la corrosión atmosférica en las aeronaves, los costos de análisis detallados son particularmente altos, se estima que solo en costos directos la fuerza Aérea Estadounidense excedió los 0,7 billones de dólares para el año 1990. Los costos totales anuales en la industria de la fuerza Aérea Estadounidense, han sido estimados alrededor de los 4 billones de dólares. Esto demuestra por que hoy, ya es usual que el mantenimiento por corrosión aeronáutica sea mas intenso que las mismas horas de vuelo.

Tipos de atmósferas y ambientes. La severidad de la corrosión atmosférica tiende a variar significativamente a lo largo de las diferentes localidades geográficas, e históricamente ha sido costumbre clasificar los ambientes como rural, urbano, industrial, marino o las combinaciones de estos.

- Rural: Este tipo de atmósfera es generalmente la menos corrosiva y normalmente no contiene poluciones químicas, pero contiene partículas orgánicas e inorgánicas que actúan como agentes corrosivos. Los principales agentes corrosivos son: la humedad, el oxígeno y el dióxido de carbono. Los ambientes áridos y tropicales son casos extremos y especiales en esta categoría.
- Urbano: Este tipo de atmósfera es similar a la rural en cuanto a que hay pequeña actividad industrial. Los agentes corrosivos presentes en ésta son los contaminantes producidos por las emisiones de los motores vehiculares y las emisiones domesticas como por ejemplo las variedades de sulfuros (SOx) y los Nitruros (NOx).
- Industrial: Esta atmósfera es la más pesada y contaminada y esta asociada a los procesos de los grandes complejos industriales y sus emisiones cargadas de concentraciones de Dióxidos Sulfúricos, Cloruros, Fosfatos y Nitratos.
- Marinos: Este tipo de atmósfera esta caracterizado por la deposición sobre las superficies de finas partículas cloradas de humedad que llevan los vientos marinos. Esta atmósfera es usualmente altamente corrosiva y su deterioro tiende a ser muy significativo dependiendo de la dirección y velocidad del viento, además de la distancia de la que se encuentre el material de la costa. Se puede hacer una analogía a este corrosivo ambiente al pensar en lo que sucede por el uso de sales para el deshielamiento sobre los caminos en muchas de las regiones frías del planeta.

1.2. TEORÍA DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

Un requerimiento fundamental para el proceso de corrosión electroquímico es la presencia de un medio electrolítico. Cuando se tienen superficies metálicas expuestas a condiciones atmosféricas, se crea una delgada película invisible

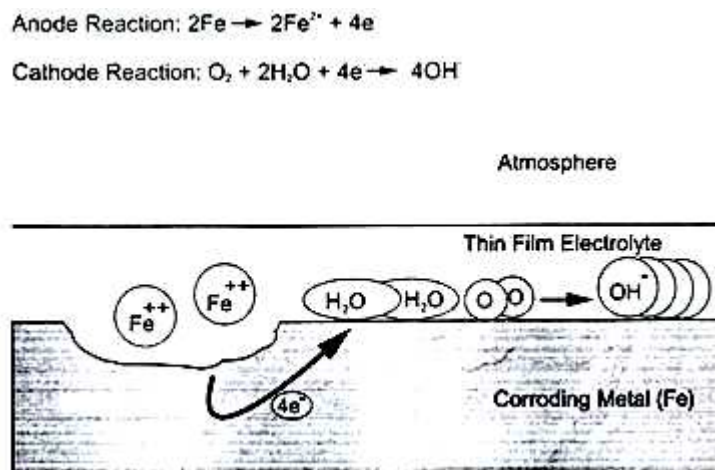
de electrolitos al alcanzar un nivel critico de humedad; por ejemplo para el caso del hierro la humedad critica es del 60% en una atmósfera libre de Dióxido de Sulfuro.

El nivel crítico de humedad no es constante, pues depende del material a ser corroído, de la permanencia de los productos de la corrosión y de los depósitos que tengan las superficies para observar la humedad y de la presencia de polución atmosférica.

Cuando un material por su exposición al ambiente forma una delgada película invisible de electrolitos se dará paso a la corrosión atmosférica por medio del balanceamiento de reacciones anódicas y catódicas. La reacción de oxidación anódica envuelve la parte disuelta del material, mientras que la reacción catódica es una reacción de oxireducción.

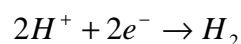
Para el hierro estas reacciones están ilustradas en el esquema de la Figura 4. Se puede notar que las concentraciones de contaminantes corrosivos pueden alcanzar relativamente altos valores sobre la delgada película de electrolitos, especialmente bajo condiciones secas y mojadas alternadamente. El oxigeno de la atmósfera es también fácilmente suministrado a esta película electrolítica colaborando a la aparición de la corrosión.

Figura 4 .Corrosión atmosférica del hierro.



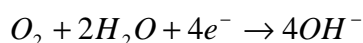
El Proceso Catódico: si se asume que la capa de la superficie electrolítica es extremadamente delgada e insignificanemente ácida, entonces la reacción de producción de hidrógeno como el presentado en la Ecuación 2, puede ser ignorada para la corrosión atmosférica de la mayoría de metales y aleaciones.

Ecuación 2.



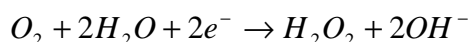
Excepciones de este supuesto pueden incluir el ataque corrosivo bajo los diferentes revestimientos cuando la producción de hidrógeno puede causar la abrasión de estos y otras condiciones de corrosión por agrietamiento. La reducción del oxígeno atmosférico es una de las más importantes reacciones donde los electrones son consumidos. Se deben de considerar también otras reacciones que envuelven al ozono y elementos nitrosos y sulfurosos cuando estos están en presencia de polución gaseosa en el aire. Para la corrosión atmosférica en soluciones electrolíticas casi neutrales se aplica la reacción de oxireducción del oxígeno. Ecuación 3.

Ecuación 3

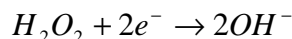


También se pueden presentar dos pasos en la reacción con el peróxido de hidrógeno como un intermediador: Ecuación 4 y Ecuación 5

Ecuación 4



Ecuación 5



Se ha observado un mecanismo de transporte para la difusión del oxígeno que se logra cuando este elemento se difunde a través de la película electrolítica hasta la superficie del metal formando un denso límite de difusión. Este mecanismo de transporte para la difusión del oxígeno es aplicable solo a delgadas capas electrolíticas de aproximadamente 30 micrómetros y bajo estrictas condiciones isotérmicas. Este límite teórico predecible de densidad de oxireducción excede significativamente las observaciones hechas en prácticas de laboratorio de los índices de corrosión atmosférica. Se puede argumentar, por lo tanto, que en general las tasas de corrosión atmosféricas pueden ser controladas no por el proceso de oxireducción catódico pero si por las reacciones anódicas.

El Proceso Anódico: La Ecuación 6 representa la reacción anódica general que corresponde a la obtención del índice determinante para el paso de la corrosión atmosférica.

Ecuación 6



La solubilidad de la formación de productos de la corrosión en la superficie electrolítica y la formación de pasivas películas afectan la totalidad del índice del proceso de disolución metálico del ánodo y causa desviaciones en la ecuación del índice.

Las películas pasivas se distinguen de los productos de la corrosión pues estas tienden a ser más adherentes, son más delgadas y proveen un alto grado de protección a ataques corrosivos. Debido a esto, los ataques atmosféricos – corrosivos sobre una superficie protegida por esta película tienden a localizarse naturalmente, por ejemplo sobre las superficies picadas y los mismos agrietamientos causados por esfuerzos corrosivos en materiales como las aleaciones de aluminio y los aceros.

Una secuencia de reacciones relativamente complejas han sido propuestas para explicar la formación de productos corrosivos y procesos de descomposición para definir las ratas de corrosión atmosférica para las diferentes clases de metales.

Se definen seis diferentes regímenes, los cuales se pueden apreciar en la

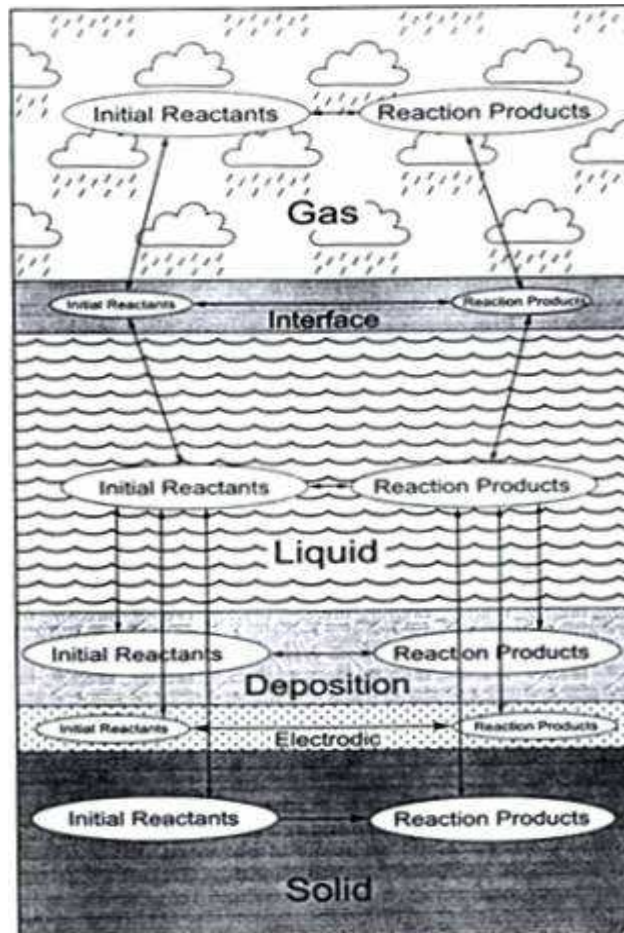
Figura 5. Estas son la región gaseosa (G) la interfase Gas – Líquido (I), la superficie líquida (L), la capa de deposición (D), la capa electrolítica (E) y los sólidos corroídos (S).

Para efectos que suceden en la capa gaseosa, como para las entradas y salidas de los elementos a través de la interfase líquida, como para las transformaciones líquidas en la fase gaseosa, como para los efectos de la radiación solar sobre las reacciones atmosféricas fotosensibles y para los efectos de la temperatura sobre la fase gaseosas, es que las reacciones cinéticas son importantes.

En el régimen de la interfase Gas – Líquido, la transferencia de moléculas dentro de la capa líquida y su interacción química en ésta ha sido estudiada. Se ha encontrado que no solo el régimen líquido recibe elementos de la fase gaseosa, si no que los elementos del líquido también se volatizan dentro de la capa gaseosa. Dentro de las variables importantes en el régimen líquido se incluye lo delgado de la película acuosa y sus efectos en la concentración de los elementos, transformaciones químicas y reacciones que involucran los iones metálicos originarios de la reacción corrosiva electroquímica.

Los productos de corrosión se decantan en una zona de depósito bajo la delgada película y se encuentran estrechamente relacionadas en la formación natural de minerales. A través de los largos periodos del tiempo, los elementos mas estables termodinámicamente siempre han dominado, la naturaleza de estos productos corrosivos que podemos encontrar sobre las diferentes superficies de los metales expuestos a la atmósfera, se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Regímenes de la corrosión atmosférica.



Los productos de corrosión se decantan en una zona de depósito bajo la delgada película y se encuentran estrechamente relacionadas en la formación natural de minerales. A través de los largos periodos del tiempo, los elementos mas estables termodinámicamente siempre han dominado, la naturaleza de estos productos corrosivos que podemos encontrar sobre las diferentes superficies de los metales expuestos a la atmósfera, se muestran en la Figura 6.

La solución conocida como "Electrolítica interior", puede ser entrampada dentro o debajo de la formación de los productos corrosivos, estos depósitos de los productos de la corrosión se pueden observar como membranas con varios grados de resistencia la transporte iónico. Las películas pasivas tienden a representar fuertes barreras al transporte iónico.

Figura 6. Productos formados por la corrosión de los metales.

| | <u>Common Species</u> | <u>Rarer Species</u> |
|----|--|--|
| Al | Al(OH) ₃ , Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O | AlOOH, Al ₂ (OH) ₆ (SO ₄) ₃ , AlCl(OH) ₂ ·4H ₂ O |
| Fe | Fe ₂ O ₃ , FeOOH, FeSO ₄ ·4H ₂ O | Fe ₃ (OH) ₂ Cl ₂ , FeCO ₃ |
| Cu | Cu ₂ O, Cu ₂ SO ₄ (OH) ₂ , Cu ₂ SO ₄ (OH) ₂ ·2H ₂ O, Cu ₂ SO ₄ (OH) ₂ | Cu ₂ Cl(OH) ₂ , Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂ , Cu ₂ NO ₂ (OH) ₂ |
| Zn | ZnO, Zn ₂ (OH) ₂ (CO ₃) ₂ , ZnCO ₃ | Zn(OH) ₂ , ZnSO ₄ , Zn ₂ Cl ₂ (OH) ₂ ·H ₂ O |

Cualquier superficie conocida tiene una compleja distribución de carga debido a sus partículas, produciendo en el electrolito adyacente una capa microscópica con propiedades físicas y químicas que difieren del primero. Este régimen electrolítico influencia la totalidad de las reacciones cinéticas en los procesos corrosivos atmosféricos (Más relevantes en el régimen sólido).

1.2. FORMAS Y MECANISMOS DE LAS FALLAS POR CORROSIÓN

Las diferentes formas de corrosión (

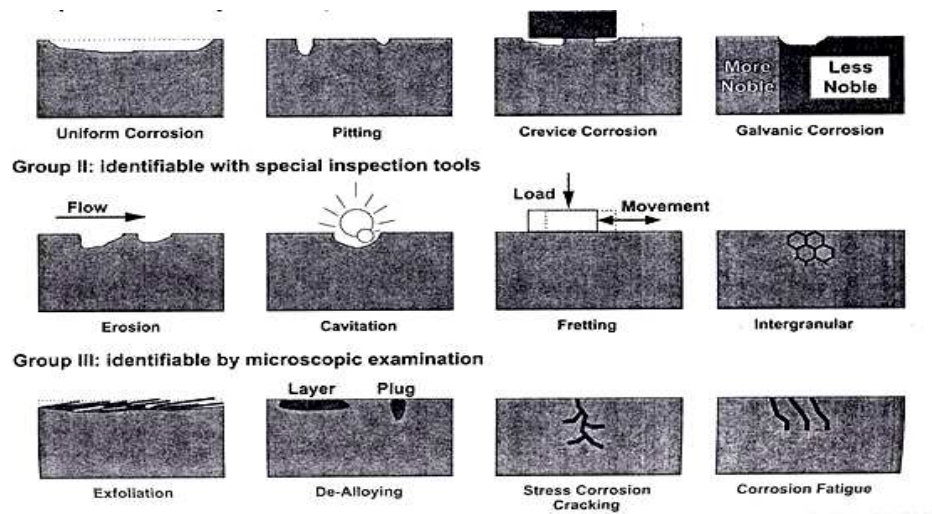
Figura 7) categorizan este fenómeno de acuerdo a su apariencia, para ello se dividen en tres grupos:

Grupo No 1: Fácilmente identificable por un examen visual ordinario.

Grupo No 2: Requieren formas suplementarias de examinación.

Grupo No 3: Su verificación requiere el uso de microscopia (óptica, electrónica, etc).

Figura 7. Principales formas de corrosión.



▪ **Corrosión Uniforme o General:** Esta se caracteriza por un ataque corrosivo producido justo sobre la superficie entera de un área o una alta proporción de esta. Un adelgazamiento del material toma lugar antes de la falla. Con base al desperdicio que esta produce, ésta forma de corrosión es líder. Aun así, la corrosión uniforme es relativamente fácil de manejar, predecir y medir, haciendo que las fallas desastrosas causadas por ésta sean realmente inusuales. La descomposición o avería del revestimiento protector de los sistemas o de las estructuras frecuentemente ceden a este tipo de corrosión destacándose por su deteriorada apariencia. Las aleaciones y aceros inoxidables resistentes a la corrosión pueden también decolorarse u oxidarse en ambientes corrosivos.

Se sabe que una superficie corroída puede ser indicada por el deterioro en el revestimiento protector de ésta, sin embargo se debe seguir examinando más de cerca pues un ataque corrosivo mas severo puede seguir avanzando. Si a esta corrosión en la superficie se le permite el continuar además de volver tosca la superficie, se puede convertir en tipos más serios de corrosión.

Un ejemplo de este tipo de corrosión uniforme es el caso que se dio con un proyectil de artillería asistido ilustrado en la Figura 8. Las causas de la falla radicarón en las pobres prácticas de manufactura, las cuales incluían el seleccionamiento de un ácido como un tratamiento antes de hacer la fosforización para la protección de la superficie, el inadecuado enjuague después del revestimiento con el fosfato, el secado a excesivas temperaturas y el pobre revestimiento de las puntas. Este ataque corrosivo, a demás de afectar la funcionalidad del equipo acarreó otro tipo de consecuencias, como en este caso la perdida de confianza de la tropa (¿Quién quiere llevar un deteriorado contenedor con TNT?)

- **Picado (Pitting):** La corrosión por picado es una forma localizada de deterioro por marcas como cavidades o huecos producidos en el material, el picado es considerado ser más peligro que el daño por corrosión uniforme, debido a que es más difícil de detectar, predecir y diseñar en contra de sus efectos. Los productos de la corrosión usualmente terminan recubriendo las mismas cavidades dejadas por estos mismos y pueden llevar a la falla fácilmente de un completo sistema de ingeniería.

La corrosión por picado es casi un denominador común en todos los tipos de ataques corrosivos localizados y puede asumir diferentes configuraciones como se ilustra en la Figura 9.

Figura 8. Corrosión uniforme presentada en un proyectil.

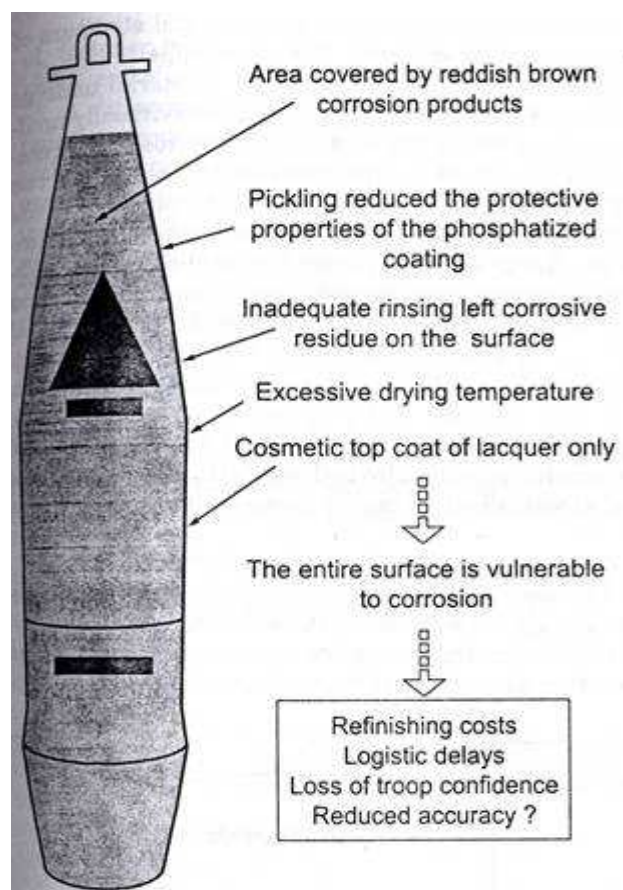
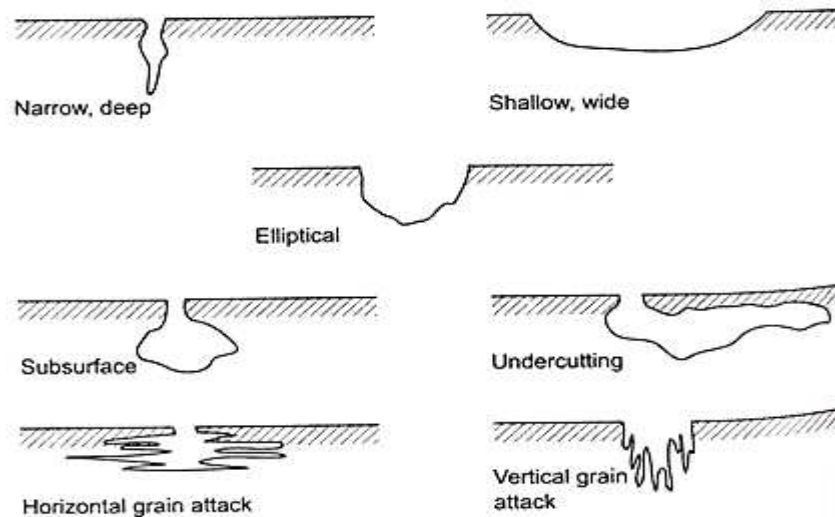


Figura 9. Variaciones típicas de las picaduras.



La corrosión por picado puede producir huecos con la boca abierta (destapados) o cubiertos con una membrana semiimpermeables de productos de la misma corrosión. Las formas de estas picadas pueden ser hemisféricas o en forma de taza, en algunos casos pueden tener paredes planas revelando la estructura cristalográfica del metal o simplemente pueden hallarse en una forma completamente irregular.

La corrosión por picado ocurre cuando discretas áreas de un material sufren un rápido ataque, mientras que la mayoría de las superficies adyacentes se mantienen virtualmente limpias. Cada localización del proceso anódico y catódico de corrosión es caracterizado por la superficie de área proporcional (S_a/S_c). Donde S_a y S_c son áreas de soporte respectivamente.

La proporción (S_a/S_c) o grado de localización, es una importante fuerza generadora de los problemas de corrosión localizados. Los ambientes micro corrosivos tienden a ser muy distintos a los ambientes en bultos, frecuentemente juegan un papel determinante en la iniciación y propagación de las picaduras por corrosión, complicando ampliamente la tarea de predicción.

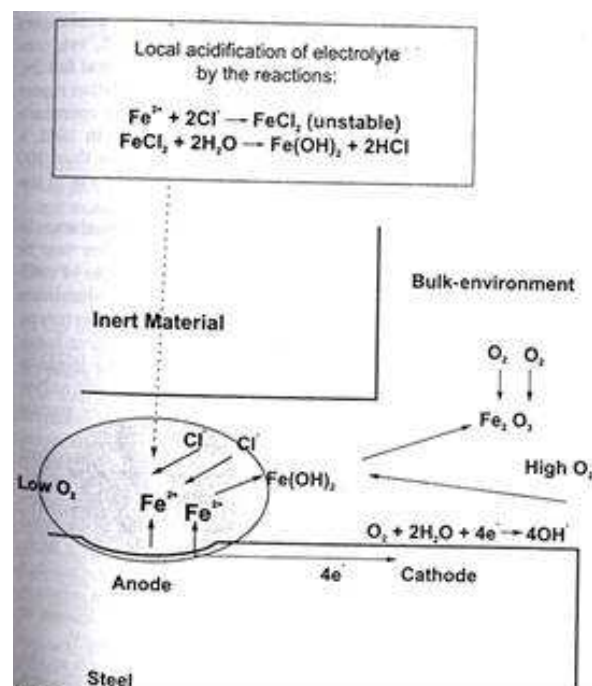
A parte de la pérdida localizada de señales, las picaduras también pueden ser perjudiciales al actuar como esfuerzos tempranos de fatiga iniciando las grietas generadas por los esfuerzos corrosivos en las bases de estas pérdidas de material.

- **Crevice:** Este tipo de corrosión es también una forma localizada de corrosión asociada con una solución estancada (inactiva) en un micro ambiente, esta se da por la formación de áreas tapadas como a manera de

filtraciones bajo juntas, arandelas, materiales aislantes, sujetadores, roscas, dobleces, laminas superpuestas, abrazaderas, etc. Como la difusión del oxígeno dentro de la grieta tapada esta restringida se crea una celda de aeración diferencial que tiende a localizarse entre la grieta tapada "Crevice" (micro ambiente) y la superficie externa (ambiente bulto).

La reacción catódica de oxireducción no se puede mantener en el área del Crevice dándole a esta un carácter anódico en la concentración de la celda. Este desbalance anódico conduce a la creación de altas condiciones corrosivas en el micro ambiente generando la disolución del metal. Esta formación del micro ambiente ácido junto con la alta concentración del Ion cloruro es ilustrado en la Figura 10.

Figura 10. Microambiente creado por crevice.



La corrosión filiforme es otra forma de deterioro cercanamente relacionada con el ataque por Crevice, pues ocurre bajo películas protectoras como lo son las lacas y es caracterizado por un camino interconectado de productos corrosivos. La mayor concentración de este ataque ocurre en la cabeza del filamento donde está establecido el corrosivo micro ambiente, mientras que la huella de la cola permanece largamente inactiva. Este problema de corrosión filiforme es también un problema de apariencia.

El daño por corrosión por Crevice en los dobleces de las juntas de las pieles de los aviones se ha convertido en el principal problema de seguridad aeronáutica,

particularmente después del incidente con la aerolínea Aloja. Ejemplo de este tipo de corrosión es el daño que causa en los fuselajes por interacción con el medio ambiente circundante.

El 28 de abril de 1988, una aeronave Boeing 737 de 19 años de operación de la aerolínea Aloja perdió la mayor parte de su fuselaje superior cercano a la sección frontal del avión en pleno vuelo a 24.000 pies de altura. La extensión del daño es mostrado en la

Figura 11.

Figura 11. Aeronave Boeing 737



Milagrosamente el piloto maniobro hasta aterrizar el avión en la isla de Maui, Hawai, pero una azafata murió y un apreciable número de pasajeros resultaron seriamente heridos. En la investigación posterior al incidente se encontraron múltiples evidencias de sitios en la estructura del avión con señales de daños por fatiga que condujeron a la falla estructural. En los resultados del reporte investigativo de seguridad nacional de transporte aeronáutico hecho en 1989, se atribuyo el accidente como una responsabilidad del operador del programa de mantenimiento al no detectar la posible falla por el daño causado por la corrosión. También, en 1981 una aeronave similar en pleno vuelo se partió dejando mas de 100 muertos. Las investigaciones apuntaron a que la corrosión acelero la fatiga en las pieles de los paneles del fuselaje como la falla del mecanismo.

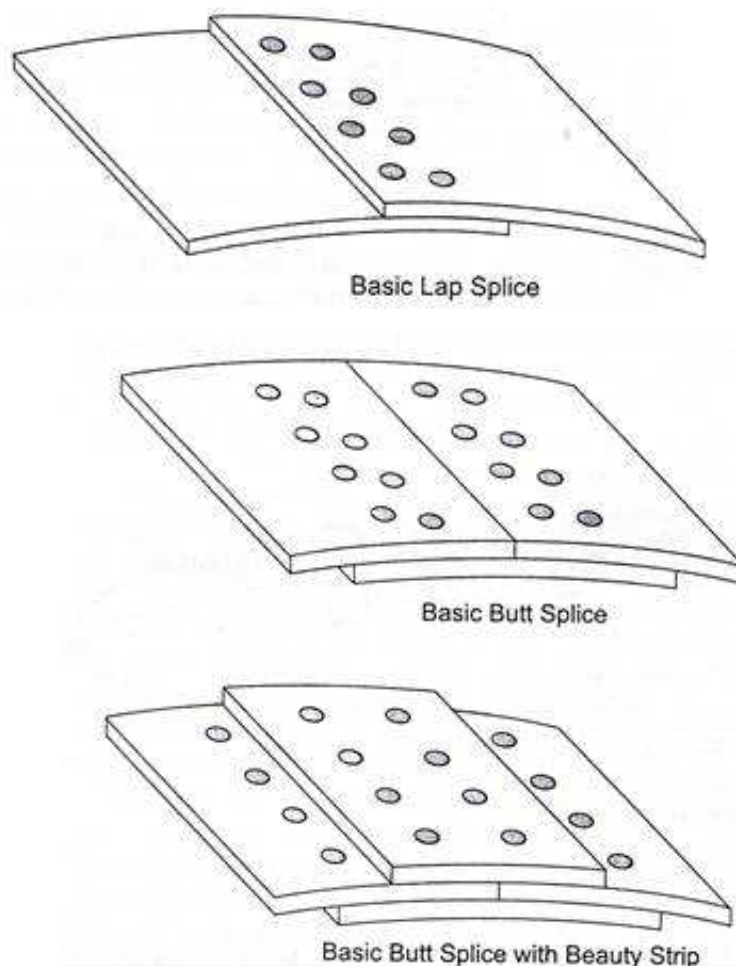
Los tres tipos básicos de empalme de los fuselajes de una aeronave son mostrados en la Figura 12.

Un diseño particular de aeronave normalmente incorpora dos o tres tipos de estos empalmes, los fuselajes comerciales son comúnmente contruidos con la aleación del aluminio 2024 T3, los pliegues de las juntas son remachas y selladas con barniz o con reforzamiento adhesivo.

El daño por corrosión en la geometría de los pliegues de las juntas por Crevice es altamente indeseable, en el caso del Alhoja, no hubo aviso de este problema, dado que los paneles del fuselaje estaban superpuestos firmemente reforzados y pegados entre ellos Figura 13.

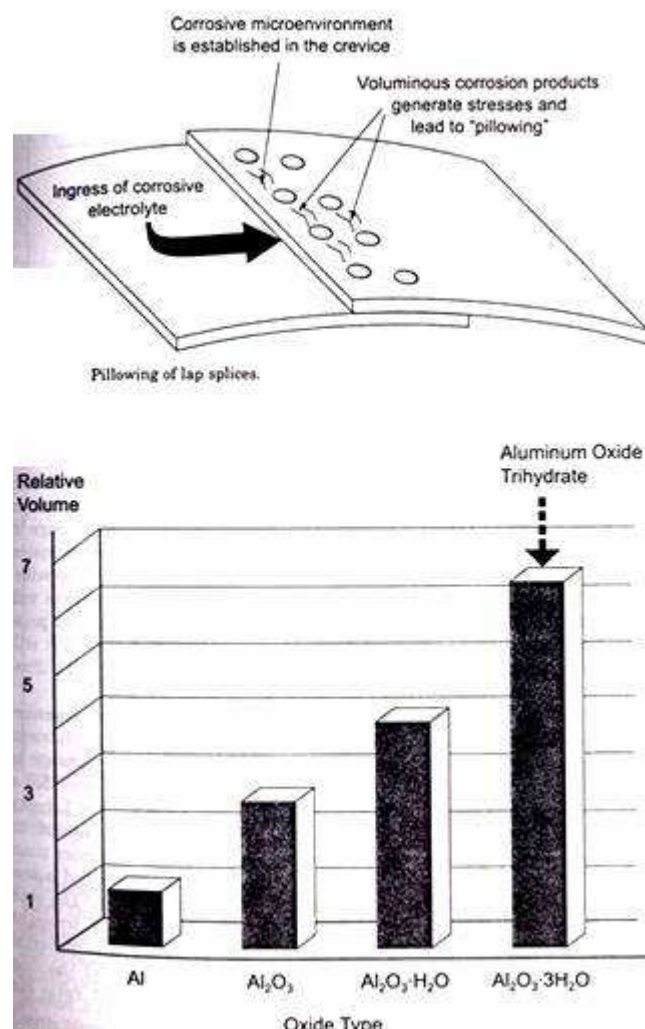
El producto prevalente de corrosión identificado en las juntas de estos fuselajes es el trióxido de aluminio, con una particularidad de expansión alta de su volumen logrando con esto el incremento desastroso de los niveles de esfuerzo cerca de los sujetadores y remaches, estos sitios críticos que se las ha visto sufrir fracturas debido a los altos esfuerzos de tensión resultantes de los residuos de la corrosión.

Figura 12. Tipos de empalme utilizados en fuselajes.



El daño corrosivo en las aeronaves comerciales y militares, en los pliegues de los fuselajes, como el efecto de los productos corrosivos se ha convertido en la principal preocupación de los programas de mantenimiento aeronáutico. Al terminar el siglo el 65% de los aviones comerciales estadounidenses para pasajeros estaban alrededor de los veinte años de vida, como es bien sabido ya los costos por riesgo y seguridad asociados a los daños corrosivos son altos. En un programa de estricta inspección de estos fueron requeridos sesenta y cinco días y noventa mil horas hombre a parte de los repuestos y los costos de personal de mantenimiento.

Figura 13. Forma del crevice en la junta y volúmenes relativos de productos de la corrosión del aluminio.



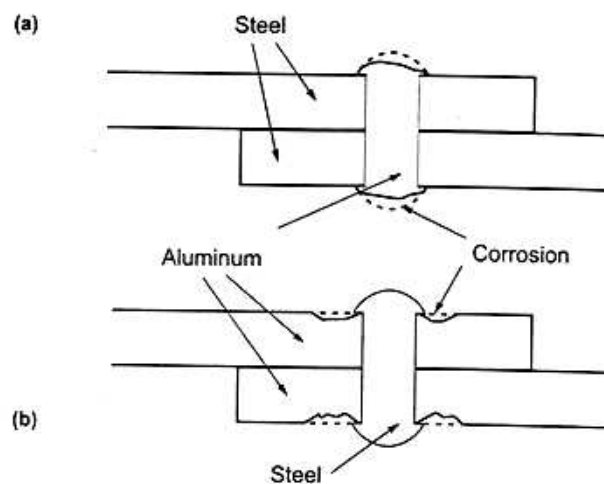
- **Corrosión Galvanica:** Esta ocurre cuando diferentes tipos de materiales metálicos entran en contacto entre sí con la ayuda de un medio electrolítico,

puede ocurrir también entre metales y aleaciones y otros materiales conductivos como el carbón o el grafito.

El material con el potencial de corrosión más noble se convierte en el cátodo de la celda de corrosión, mientras que el material menos noble es consumido por una solución anódica. Para este fenómeno el área proporcional entre los dos materiales es extremadamente importante. Si la proporción de área entre las superficies ánodo – cátodo es pequeña, o S_a/S_c es alta, el proceso galvanico se concentra en una pequeña área anódica.

La velocidad de corrosión, el visible adelgazamiento y la pérdida de material a través del tiempo es alta para el ánodo. Por ejemplo, si los remaches de aluminio fueran usados sobre discos de acero, los remaches se corroerían extremadamente rápido Figura 14.

Figura 14. Corrosión galvanica en remaches de aluminio.



La serie galvanica de la figura 15, muestra la relativa nobleza de un rango de materiales en un medio electrolítico para el caso tomado como el agua de mar. En términos generales los dos materiales mas distantes están en las puntas en las series galvanicas y representan el riesgo mas grande de este tipo de corrosión. La serie no da información de la velocidad de este ataque, además la posición relativa de los materiales puede cambiar según el medio electrolítico o ambiente.

Los efectos galvanicos se manifiestan no solo a nivel macroscópico si no también en la micro estructura del material, con ciertas fases o precipitaciones que pueden sufrir disolución anódica bajo efectos microgalvanicos.

Es increíble que aunque el principio de la corrosión galvanica es ampliamente conocido, sus características son notadas todavía en numerosas estructuras que fallaron por este tipo de corrosión. La Figura 16 ilustra los principales factores que intervienen en una situación de corrosión galvanica.

Figura 15. Serie galvanica.

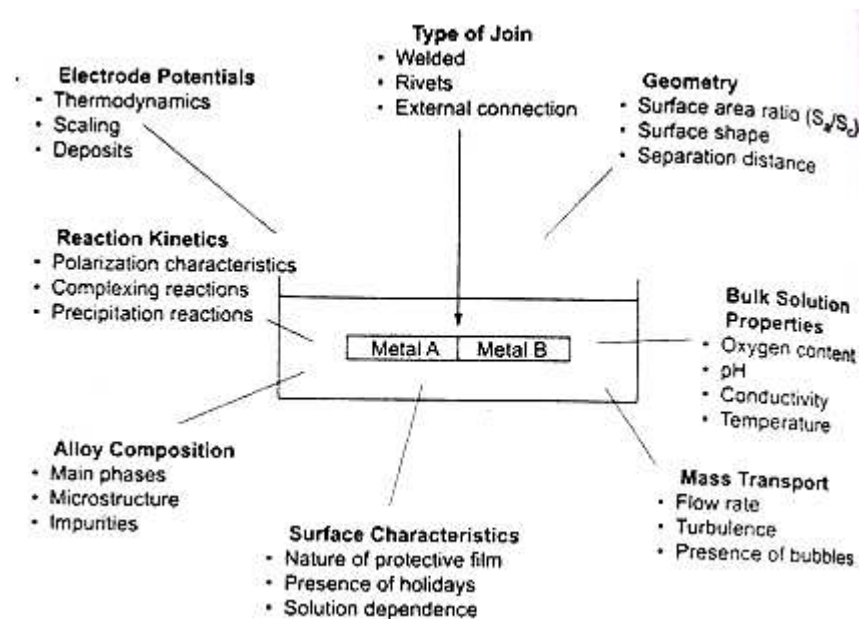
| | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Noble or cathodic | Platinum |
| | Gold |
| | Graphite |
| | Titanium |
| | Silver |
| | Chlorimet 3 |
| | Hastelloy C |
| | 18-8 Mo stainless steel (passive) |
| | 18-8 stainless steel (passive) |
| | Chromium steel > 11% Cr (passive) |
| | Inconel (passive) |
| | Nickel (passive) |
| | Silver solder |
| | Monel |
| | Bronzes |
| | Copper |
| | Brasses |
| | Chlorimet 2 |
| | Hastelloy B |
| | Inconel (active) |
| | Nickel (active) |
| | Tin |
| | Lead |
| | Lead-tin solders |
| | 18-8 Mo stainless steel (active) |
| | 18-8 stainless steel (active) |
| Active or anodic | Ni-resist |
| | Chromium steel > 11% Cr (active) |
| | Cast iron |
| | Steel or iron |
| | 2024 aluminum |
| | Cadmium |
| | Commercially pure aluminum |
| | Zinc |
| | Magnesium and its alloys |

Un caso bien conocido que ha sufrido corrosión galvánica severa en la historia es la Estatua de la Libertad, hay una excelente publicación en la que se detalla el daño corrosivo sufrido por la estructura y las medidas correctivas tomadas.

La Estatua de la Libertad, fue oficialmente inaugurada el 28 de octubre de 1866 en la isla de Bedloe, en el puerto de New York. El diseño de la estatua de mas de 91 metros de alto es esencialmente un poste envuelto en una estructura

secundaría la cual sostiene otro marco estructural en forma de armadura y a la cual esta sujeta la piel.

Figura 16. Factores que afectan la corrosión galvanica.



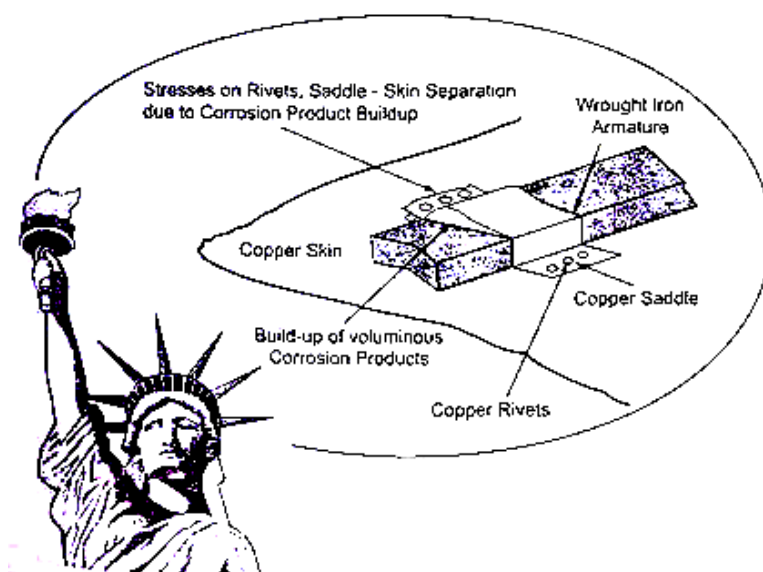
El esqueleto entero fue fabricado en hierro, el material de construcción más común para la época. El cobre fue el material seleccionado para la piel por su facilidad para moldear los detalles artísticos, durabilidad y buena resistencia según las expectativas de los materiales comerciales disponibles en la época.

Unos componentes cruciales en la sujeción de las laminas de cobre fueron las abrazaderas, estas en forma de “U” enrolladas alrededor de una barra de hierro y remachas a la piel de cobre fueron alrededor de 1.500 las que se usaron en la estatua. Ver Figura 17.

Durante la construcción en EEUU, asbestos impregnados de laca fueron colocados entre la armadura y la piel, pero se desintegraron con el tiempo, actuando como la indeseable cavidad para el electrolito corrosivo. Otro error más, fue que la estatua nunca fue probada para condiciones de resistencia al agua, una insignificante gotera que tomo lugar a través de la antorcha gracias a la localización de unas luces adicionales, causo un ataque de corrosión severo galvanico a la piel. Esto se dio con la ayuda de la aplicación de los principios de la serie galvanica y la infavorable proporción de las áreas entre los materiales

en los que estaba construida la estatua. La fuerza expansiva de los productos de la corrosión del hierro, desfiguraron extensamente la piel de cobre, convirtiendo así la estatua en el problema de corrosión galvanica que ha necesitado el mayor proyecto masivo de restauración excediendo los 200 millones de dólares.

Figura 17. Corrosión galvanica de la estatua de la libertad.



Después de probar la compatibilidad galvanica y considerar las necesidades y los requerimientos mecánicos de todos los materiales y la estructura de hierro, se decidió reemplazar esta última con un acero inoxidable AISI tipo 316L. Esta aleación de acero inoxidable fue seleccionada sobre la base de que el contacto electrolítico con la piel de cobre era improbable, para mayor seguridad inspecciones de las series galvanicas revelaron que asumiendo que el acero inoxidable se comporte pasivo, las largas superficies de cobre tenderán a actuar como ánodos. Como una lejana y secundaria preocupación, un barrido de teflón fue aplicado entre la nueva armadura de acero inoxidable y la piel de cobre y sus abrazaderas.

- **Corrosión por erosión:** Este es un daño acumulativo inducido por reacciones corrosivas electroquímicas y los efectos mecánicos del movimiento relativo del electrodo y la superficie corroída. La corrosión por erosión esta definida como la acelerada degradación en presencia de un movimiento relativo de alta velocidad, con desgaste mecánico y efectos abrasivos. Ranuras, cavidades, huellas redondeadas y ondulaciones sobre la superficie usualmente son indicadores característicos de las direcciones de estas formas de corrosión.

La corrosión por erosión es encontrada en sistemas como tuberías (Especialmente codos, dobleces y juntas), válvulas, bombas, boquillas, intercambiadores de calor, aspas de turbinas, deflectores y molinos.

- **La cavitación:** Es una forma especial de corrosión erosiva, el movimiento de partículas líquidas como burbujas de vapor colapsan inestablemente induciendo el daño en la superficie.

- **La corrosión por frotamiento (fretting):** Es el deterioro producido por el roce de las asperezas de las superficies en contacto, esta también está incluido como un tipo de corrosión erosiva. El daño es inducido bajo carga y en presencia de movimientos relativos con respecto a una superficie, provocados por ejemplo por vibración. Picaduras o ranuras y desechos óxidos también caracterizan este fenómeno típicamente encontrado en maquinaria, ensambles con pernos y cojinetes de bola o cilindros.

2. ALUMINIOS

El aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la tierra, ha sido estimado que aproximadamente el 8 % de la corteza terrestre esta compuesto por este elemento usualmente encontrado e forma de oxido conocido como “bauxita”. El aluminio se ha convertido en el metal no ferroso más ampliamente usado para fines de la ingeniería.

- **Aleaciones de Aluminio:** Las aleaciones del aluminio están divididas en dos extensas clases: Las aleaciones fundidas y forjadas, y las aleaciones trabajadas mecánicamente; estas últimas subdivididas entre las aleaciones con y sin tratamientos térmicos.

- **Propiedades Mecánicas:** Las propiedades mecánicas de los aluminios pueden ser mejoradas por las aleaciones, los tratamientos térmicos, el endurecimiento por deformación o la combinación de cualquiera de estas técnicas. El Cobre, el Magnesio, el Manganeso, Silicio y el Zinc son usados como los principales elementos constituyentes en las aleaciones de aluminio. El Cromo el Níquel y otros elementos son usados con propósitos especiales y en menor cantidad para aleaciones con usos específicos.

El aluminio y sus aleaciones pueden endurecerse por trabajos en frío para la resistencia atención de 200 ó hasta 300 Mpa, resistencias más altas son alcanzadas por las aleaciones tratadas térmicamente.

2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ALUMINIOS

- **Fundiciones de Aluminio.** Para las fundiciones de aluminio hay 3 procesos de aleación comúnmente usados: arena, molde permanente y fundición troquelada. Las siguientes combinaciones de elementos constituyen la familia principal de las aleaciones por fundición:

- Aluminio Puro: Raramente usado en la condición de fundición pero es especialmente requerido para aplicaciones eléctricas.
- Al - Si: El silicio es el principal elemento para brindar buena fundibilidad en las aleaciones de aluminio.
- Al - Si - Mg: Son buenas aleaciones fundidas, las cuales pueden ser tratadas y endurecidas para obtener mejores propiedades mecánicas.
- Al - Mg: es la mejor combinación de resistencia y dureza de todas las aleaciones de aluminio fundidas.

- Al - Cu: Poseen moderadamente alta resistencia, media o pobre resistencia al impacto y de rápidas propiedades para la fundición. Esta es la aleación de aluminios de más pobre resistencia a la corrosión.
- Al - Mn: Es una aleación de mala calidad, no tratable térmicamente, de pobres propiedades mecánicas, de razonable fundibilidad, pero de excepcional para aplicaciones en cojinetes no cargados a altas temperaturas superiores a 500c°(por ejemplo, incineradores a gas de las cocinas domesticas).

Los principales métodos para las aleaciones de aluminio fundido son las siguientes:

- Fundición troquelada a altas presiones de vacío: Es una fundición del metal formada cuando este es inyectado dentro de una cavidad que no contiene aire bajo presiones en un rango de 14 a 70 Mpa. Estas fundiciones pueden ser sometidas a temperaturas superiores a los 450 c° sin ampollarse.
- Fundición troquelada a ultra – altas presiones de vacío: Es una fundición del metal formada cuando este es inyectado dentro de una cavidad que no contiene aire bajo presiones en un rango de 14 a 140 Mpa.
- Fundición troquelada al vacío tratada térmicamente: Es una fundición troquelada que ha sido tratada térmicamente para aumentar sus propiedades.
- Fundición troquelada en molde permanente a altas presiones de vacío: Es una fundición formada cuando un molde de aleación permanente es inyectado dentro de una cavidad que no contiene aire bajo altas temperaturas.

Las composiciones por fundición son descritas por un sistema de 3 dígitos seguidos de un valor decimal. El decimal .0 en todos los casos pertenece al límite de la aleación fundida el decimal .1 y .2 concierne a las composiciones en barra:

- 1xx.x. Controla composiciones no mezcladas (puras), especiales para la manufactura de rotores.
- 2xx.x. Aleaciones donde el cobre es el principal elemento.
- 3xx.x. Aleaciones donde el silicio es el principal elemento, pero otros elementos de aleación como el cobre y el magnesio son especificados.
- 4xx.x. Aleaciones donde el silicio es el principal elemento.
- 5xx.x. Aleaciones donde el magnesio es el principal elemento.

- 6xx.x. En desuso.
- 7xx.x. Aleaciones donde el zinc es el principal elemento, pero otros elementos de aleación como el cobre y el magnesio son especificados.
- 8xx.x. Aleaciones en donde el titanio es el principal elemento.
- 9xx.x. En desuso.

▪ **Aluminios Forjados.** El aluminio superpuro (99.99+%) es limitado para ciertos elementos de plantas químicas y aplicaciones que requieran máxima resistencia a la corrosión y/o alta ductilidad, donde el alto costo sea justificado.

Otras aleaciones son Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Li y Al-Sn.

Para las aleaciones forjadas, un sistema de 4 dígitos es usado el cual se muestra a continuación:

- 1xxx. Controla composiciones no mezcladas del 99% o mayor pureza caracterizadas generalmente por su excelente resistencia al ataque por un amplio rango de agentes químicos, Alta conductividad térmica y eléctrica y bajas propiedades mecánicas. Por ejemplo, el 1100-O tiene a temperatura ambiente una resistencia mínima a tensión de 75 MPa. y un campo de resistencia de 25 Mpa. El hierro y el silicio son las principales impurezas. La pureza comercial del metal (99.00 hasta 99.80%) está disponible en 3 purezas y un rango de dureza de trabajo en grados, para una amplia variedad de aplicaciones generales más una composición especial para propósitos eléctricos. El aluminio de alta pureza es usado para diversos fines eléctricos y procesos en aplicaciones de equipos. La alta pureza de los miembros del grupo 1xxx es usada en equipos contenedores de productos como el peróxido de hidrógeno y el ácido nítrico para fumigación.
- 2xxx. Son aleaciones en donde el cobre es el principal elemento de aleación, a la vez de otros elementos, notándose más el magnesio según especificaciones. Este grupo envuelve la primera etapa de aleaciones de buena dureza y recubrimientos en un rango de composiciones. El grupo de las aleaciones 2xxx son materiales altamente resistentes, pero su contenido de cobre reduce la resistencia a la corrosión. Discos y láminas son usualmente recubiertos con una capa de aluminio puro aproximadamente del 5 % a cada lado.
- 3xxx. Son aleaciones donde el principal elemento es el manganeso. La adición de cerca de 1.25% incrementa la resistencia sin afectar la ductibilidad. Aleaciones alternativas con no sólo manganeso sino que también pequeñas

adiciones de magnesio tienen aún mayor resistencia mientras mantienen una buena ductilidad. En general, estas aleaciones son caracterizadas por tener muy buena resistencia a la corrosión y moderada resistencia. Por ejemplo, el 3003 – O a temperatura ambiente tiene una resistencia mínima a tensión de 125 MPa. y un campo de resistencia de 35 MPa. Este es maleable fácilmente soldable y puede aplicarse en recubrimientos para proveer excelente resistencia al ataque por pitting, y es uno de las aleaciones de aluminio más ampliamente usadas para tanques, intercambiadores de calor y tuberías.

- 4xxx. Aleaciones en las cuales el silicio es el principal elemento la adición de silicio al aluminio baja sustancialmente el punto de fusión sin volver la aleación frágil.
- 5xxx. Aleaciones en las cuales el magnesio es el principal elemento. Estas aleaciones son caracterizadas por su resistencia a la corrosión y moderada resistencia a esfuerzos. Por ejemplo, el 5858 – O a temperatura ambiente tiene una resistencia mínima a tensión de 215 MPa. y un campo de resistencia de 80 MPa. Existen 5 composiciones estándares con magnesio con contenidos superiores de 4.9 % y pequeñas cantidades de Mn o Cr. Son aleaciones para trabajo en duro con una resistencia y ductibilidad de alta a moderada y una alta resistencia a la corrosión por agua marina. Son extensamente usados para equipos criogénicos y largos almacenamientos en tanques para nitratos de amoníaco y combustible de aeronaves.
- 6xxx. Son aleaciones en las cuales el magnesio y el silicio son los principales elementos. Estas pueden ser fácilmente extruidas poseen buena maleabilidad y pueden ser anodizadas fácilmente. Estas aleaciones poseen moderada resistencia y buena ductilidad en condición de tratamiento térmico y envejecimiento. La popular 6061-T6 tiene 260 MPa. de esfuerzo mínimo de tensión y un campo de esfuerzos mínimo de 240 MPa. La aleación 6063 tiene buena resistencia a la corrosión atmosférica y es la aleación de aluminio mas comúnmente usada para formas extruidas como ventanas y puertas. Aleaciones como la 6061 y 6063 contienen balanceadas proporciones de magnesio y silicio para formar una segunda fase estequiometrica intermetálica constitutiva, el magnesio sílice Mg_2Si . Las aleaciones como el 6351 contienen un exceso de silicio sobre el magnesio por lo que son térmicamente desbalanceadas.
- 7xxx. Son aleaciones en las cuales el zinc es el principal elemento, pero otros elemento como cobre, magnesio, cromo y zirconio pueden ser especificados. Un bajo rango de adiciones de Zn/Mg provee razonables niveles de esfuerzos y buena maleabilidad.
- 8xxx. Estas aleaciones incluyen titanio y un poco de litio que caracterizan sus variadas composiciones. La mayoría de los 8xxx no son

tratables térmicamente, pero cuando son usadas con sobre aleaciones tratadas térmicamente, estas pueden adquirir los constituyentes de la otra.

- 9xxx. En desuso.

▪ **Sistema de designación de tratamientos para aleaciones de aluminio.**

- F. *forma de fabricación*. Aplica para productos enchapados en oro, trabajados en caliente o en procesos de revestimientos donde ningún control especial sobre las condiciones termales o esfuerzos por endurecimiento sea empleado.
- O. *Recocidos*. Aplica para los productos de recubrimientos que son recocidos para obtener bajas resistencias y mejorar ductilidad y estabilidad dimensional. La O puede ir seguida de un dígito diferente al cero, cada dígito indica especiales características. Por ejemplo, para aleaciones tratadas térmicamente la O1 significa que se trata de un producto que fue tratado aproximadamente al mismo tiempo y temperatura de la requerida para la solución del tratamiento y luego llevado a temperatura ambiente con aire frío.
- H. *Endurecimiento por deformación (sólo productos de recubrimiento)*. Aplica para productos que han sido reforzados por endurecimiento por deformación, con o sin tratamiento térmico suplementario para producir alguna reducción de los esfuerzos. La letra H siempre es seguida de dos dígitos o más, indican el grado endurecimiento por la deformación y es un número del 1 al 8 (H1,H2...)
- H1. Solo Endurecidos a Tensión. Aplica a productos que son endurecidos a tensión para obtener la fuerza deseada sin un tratamiento térmico suplementario. El dígito que sigue el H1 indica el grado de endurecimiento a tensión.
- H2. Endurecido a tensión y parcialmente templado. Aplica a productos que son endurecidos a tensión más que la cantidad final deseada y luego reducidos en fuerza al nivel deseado por un recocido parcial. el dígito que sigue el H2 indica el grado de endurecimiento a tensión que permanece después de que el producto se ha templado parcialmente.
- H3. Endurecido a tensión y estabilizado. Aplica a productos que son endurecidos a tensión y cuyas propiedades mecánicas son estabilizadas por un tratamiento térmico a baja temperatura que ligeramente disminuye las fuerzas a tensión y mejora la ductilidad. Esta designación es aplicable sólo a esas aleaciones que, se estabilizan, gradualmente con la temperatura del cuarto. El

digito que sigue el H3 indica el grado de tensión que endurecido después de la estabilización.

- W. Tratados en solución térmica. Es un temple inestable aplicable sólo a aleaciones que naturalmente envejecen después del tratamiento de calor de la solución. Esta designación sólo es específica cuando el período de envejecimiento natural es el indicado.
- Tratamientos térmicos para producir temples estables de otra manera más que F, O, o H. Aplica a productos que son térmicamente tratados, con o sin el endurecimiento a tensión suplementario, para producir los temples estables. El T siempre se sigue por uno o más dígitos:
 - T1. Enfriado de un elevado proceso termoformando y naturalmente envejecido a una condición substancialmente estable. Aplica a los productos que no fueron trabajados en frío después de un elevado proceso termoformando como la extrusión y por el cual las propiedades mecánicas han sido estabilizadas por la temperatura del cuarto.
 - T2. Enfriado de un proceso elevado de termoformando, trabajado en frío, y naturalmente envejecido a una condición substancialmente estable. Aplica a los productos que son trabajados en frío para mejorar la tensión después de enfriado de un proceso activo caliente como el rolado o la extrusión y para los cuales se han estabilizado las propiedades mecánicas por el envejecimiento de la temperatura del cuarto.
 - T3. Tratados en solución térmica, trabajo en frío, y naturalmente envejecido a una condición substancialmente estable. Aplica a productos que están trabajados en frío específicamente para mejorar la fuerza después de un tratamiento de solución térmico para el cual las propiedades mecánicas han sido estabilizadas por el envejecimiento la temperatura del cuarto.
 - T4. Tratados en solución térmica y naturalmente envejecidos a una condición substancialmente estable. Aplica a productos que no están trabajados en frío después del tratamiento en una solución térmica y para los cuales las propiedades mecánicas han sido estabilizadas por el envejecimiento de temperatura del cuarto.
 - T5. Enfriado de un proceso elevado de termo formado y artificialmente envejecido. Aplica a los productos que no están trabajados en frío después de un proceso elevado de termo formado como la extrusión y para los cuales las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional o ambas han mejorado substancialmente por la precipitación de un tratamiento térmico.

- T6. Tratado con una solución térmica y artificialmente envejecido. Aplica a los productos que no han sido trabajados en frío después de un tratamiento en solución térmica y para los cuales las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional o ambos han mejorado substancialmente por la precipitación de un tratamiento térmico
- T7. Tratado en solución térmica y estabilizado. Aplica a los productos que han tenido un tratamiento térmico precipitado en la que ellos se encuentran sobre envejecidos. El tratamiento térmico de estabilización lleva las propiedades mecánicas más allá del punto de esfuerzo máximo proporcionándole algunas características especiales, como un refuerzo a la resistencia a los esfuerzos corrosivos de agrietamiento o exfoliación de la corrosión por picaduras.
- T8. Tratado en solución térmica, trabajado en frío y artificialmente envejecido. Aplica a productos que son trabajados en frío, especialmente para mejorar la resistencia después de un tratamiento térmico en solución y para las cuales las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional, o ambas han sido substancialmente mejoradas por un tratamiento térmico precipitado
- T9. Tratado en solución térmica, trabajado en frío, y artificialmente envejecido. Aplica a productos que están trabajados en frío específicamente para mejorar la resistencia después de que han sido tratados térmicamente por precipitación
- T10. Enfriado de un elevado proceso de termo formado, trabajado en frío y artificialmente envejecido. Aplica a productos que son trabajados en frío específicamente para mejorar la resistencia después del enfriado de un proceso activo caliente como el rolado o la extrusión y para que sus propiedades mecánicas, estabilidad dimensional, o ambas sean ampliamente mejoradas por el tratamiento térmico precipitado.

2.2. RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ALUMINIO.

La resistencia a la corrosión del aluminio depende de una película del óxido protectora. Esta película es estable en un medio acuoso cuando el PH esta alrededor de 4.0 y 8.5. La película de óxido renueva ella misma naturalmente y una abrasión accidental u otro daño mecánico de la superficie de la película es rápidamente reparado. Las condiciones que generan la corrosión del aluminio y sus aleaciones, son entonces, aquellos que continuamente desgastan la película mecánicamente o promueven condiciones que localmente degradan la película protectora de óxido y minimizan la disponibilidad de oxígeno para reconstruirla.

La acidez o alcalinidad del ambiente afectan la conducta de corrosión de aleaciones aluminicas significativamente. A bajo o alto PH, el aluminio tiende a corroerse pero no significa que siempre sea así. Por ejemplo, El aluminio es bastante resistente al ácido nítrico concentrado. Cuando el aluminio se expone a las condiciones alcalinas, la corrosión puede ocurrir, y cuando la película del óxido se perfora localmente, el ataque acelerado ocurre porque el aluminio se ataca más rápidamente que su óxido bajo las condiciones alcalinas. El resultado es pitting (picadura). En condiciones ácidas, el óxido se ataca más rápidamente que el aluminio, y un ataque mas general es el resultado.

Como una regla general, las aleaciones aluminicas, particularmente la serie 2xxx, son menos resistentes a la corrosión que el metal puro comercial. Por ejemplo, algunas aleaciones aluminicas son susceptibles a la corrosión intergranular como resultado las reacciones a bajas temperaturas de envejecimiento y la precipitación subsecuente en los límites de grano. La susceptibilidad al ataque intergranular en estas las aleaciones es la muestra de la exfoliación y el agrietamiento por los esfuerzos corrosivos (SCC).

El aluminio se usa en los sistemas purificadores de aguas y para sostener y transferir una variedad de soluciones orgánicas. Los bajos niveles de alcohol pueden dar problemas en el almacenamiento, El mercurio y las soluciones saladas de metales pesados también darán problemas. La exfoliación y la SCC no son los problemas comerciales con las series 1xxx, 3xxx, 4xxx, y 6xxx, o las aleaciones 5xxx que contienen menos del 3% de magnesio. las aleaciones susceptibles (2xxx, 5xxx con el magnesio más alto, y 7xxx) no se ha usado en cantidades mayores en los procesos químicos industriales. Pueden usarse tratamientos de calor, como el sobre envejecimiento, para mejorar sistemas que son susceptibles. Históricamente, las aleaciones de Al-Zn-Mg han sido los más susceptibles al agrietamiento.

La corrosión galvánica es un problema potencial cuando el aluminio se usa en las estructuras complejas. El se comporta como un ahondo para la mayoría de los materiales de construcción comunes, como el hierro, el acero estructural, el titanio, cobre, y las aleaciones del níquel, Si una situación galvánica se incrementa, el aluminio se corroerá preferencialmente. Esto puede causar el servicio poco satisfactorio. El aluminio puede usarse en una gama amplia de condiciones medioambientales sin protección de la superficie y con el mantenimiento mínimo. Se usa a menudo para su resistencia buena a las condiciones atmosféricas, así como los humos industriales y vapores. También se usa ampliamente en las aplicaciones criogénicas debido a sus propiedades mecánicas favorables a las bajas temperaturas (puede usarse por debajo de los -250°C).

- **El efecto de la Aleación** Las adiciones de aleaciones de elementos al aluminio cambian el potencial electroquímico de la aleación, la cual afecta la

resistencia de corrosión incluso cuando los elementos están en solución sólida. El Zinc y el Magnesio tienden a cambiar el potencial notablemente en la dirección anódica, Así el silícico tenga un efecto anódico menor. Las adiciones de cobre causan marcados cambios catódicos. Esto resulta en localizaciones anódicas y lugares catódicos en el metal que afecta el tipo y proporción de la corrosión.

El aluminio muy alta o puro, 99.99%, es muy resistente al pitting (picadura). Cualquiera aleación adicional reducirá su resistencia. La serie 5xxx de aleaciones con Mg y las series 3xxx con aleaciones de Al-Mn son la mayoría aleaciones resistentes a la corrosión por pitting. El metal puro y las series de aleaciones 3xxx, 5xxx, y 6xxx son resistentes a las formas más perjudiciales de corrosión localizada, como exfoliación, y el SCC. Sin embargo, las aleaciones de las series 5xxx trabajadas en frío contienen magnesio en un exceso de solubilidad sólido (sobre 3% de magnesio) puede volverse susceptible a la exfoliación y SCC cuando se exponga al calor por largos periodos a temperaturas por entre 80 a 175°C.

▪ **El efecto de tratamientos metalúrgicos y mecánicos.** Los tratamientos metalúrgicos y mecánicos usualmente actúan en sinergia para producir las deseada o no deseadas propiedades micro estructurales en las aleaciones de aluminio. Las variaciones en los tratamientos térmicos pueden tener efectos marcados la química local y en la resistencia a la corrosión local de altos esfuerzo, en las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente. Con suerte, todos los elementos de aleación deben disolverse totalmente, y la proporción del enfriamiento debe ser lo suficientemente rápida para mantenerse en solución sólida.

Generalmente, las prácticas que resultan en una micro estructura no uniforme serán de resistencia más baja a la corrosión, sobre todo si el efecto micro estructural es localizado. El Tratamiento de la precipitación o envejecimiento se dirige para aumentar la resistencia principalmente. Algunos tratamientos de precipitación su propósito es exceder el aluminio a la máxima condición de esfuerzo (T6 Templados) para mejorar su resistencia a la IGC, exfoliación, y SCC a través de la formación aleatoriamente distribuida, no coherente precipitados (T7 templados). Esto disminuye el efecto adverso de alta localización de la precipitación en los límites de los graos resultados del bajo enfriamiento, envejecimiento para alcanzar el máximo las fuerzas.

Las influencias del trabajo mecánico influencia la morfología del grano y la distribución de las partículas constituyentes de las aleaciones. Estos dos factores pueden afectar el tipo y proporción de la corrosión localizada. el lanzamiento de los productos de aluminio normalmente tienen una estructura de grano equiaxial. Pueden tomarse las rutas del proceso especiales para producir fino, granos equiaxiales en hojas roladas delgadas y ciertas formas

extruidas, pero la mayoría de los productos forjados (rolado, forjado, productos extruidos) normalmente tienen una alta direccionalidad, anisotropía de la estructura del grano. Los productos rectangulares tienen una estructura de grana en tercera dimensión (3D). Casi todas las formas de corrosión, incluso el pitting, son hasta cierto punto afectadas por esta direccionalidad del grano. Sin embargo, hay altas formas de corrosión localizadas, como la exfoliación y SCC que proceden a lo largo de los límites del grano, están altamente afectados por la estructura del grano. Las formas de grano en paquete largos, anchos, y muy delgados son virtualmente un requisito previo para un grado alto de susceptibilidad a la exfoliación. Estas estructuras direccionales afectan la resistencia notablemente a SCC y a la exfoliación de productos de aleación de alta resistencia.

- **El Papel del Hidrógeno.** El hidrógeno se disolverá en las aleaciones de aluminio en el estado fundido y durante los tratamientos térmicos a temperaturas cerca del punto de fundición en atmósferas que contienen vapor de agua o hidrocarburos. Durante la solidificación, es causa de porosidad y ampollamiento de la superficie.

Hay alguna evidencia que el hidrógeno envolvente de una disolución anódica en la punta de la grieta puede disolverse dentro del metal en la barrera del grano adelante de la punta de la grieta y puede convertirse en un factor de SCC de algunas aleaciones 7xxx y posiblemente 2xxx. Como sea no se han restringido la comercialización de aleaciones de aluminio de alta resistencia

- **Los recubrimientos:** Como se menciona anteriormente el aluminio puro, las series de aleación 3xxx, 5xxx, y la mayoría de las series de aleación 6xxx, son suficientemente resistentes para ser usadas en las atmósferas industriales y aguas sin ningún recubrimiento. Los ejemplos de esto son: barcos, y productos de construcción. Generalmente las capas son usadas para reforzar la resistencia en aleaciones, y la protección es considerada necesaria para la alta resistencia de las series de aleaciones 6xxx y para todas las aleaciones 2xxx y 7xxx.

3. CÁMARA AMBIENTAL

La cámara ambiental es una herramienta del mantenimiento predictivo que mediante la simulación de las diferentes condiciones atmosféricas logra recrear el ambiente real al que están expuestas las pieles y estructuras de las aeronaves. Con la exposición de piezas y componentes hechos con diferentes materiales y aleaciones a un ambiente controlado se puede estudiar el curso natural de la corrosión y sus efectos en dichos elementos.

La cámara esta en capacidad de imitar variables ambientales como temperatura, presión y humedad relativa, y con la variación de estas simular los ambientes de los diferentes lugares geográficos donde operan las aeronaves de la FAC, la cámara desarrollada en el CITA aparece en la Figura 18.

Figura 18. Vista general de la cámara ambiental del CITA.



El funcionamiento de la máquina esta constantemente monitoreado por un software de visualización en tiempo real, así de manera continua durante las simulaciones efectuadas todas las variables están siendo controladas y registradas.

La cámara ambiental es un proyecto del CITA que fue planeado en dos etapas, la primera ya culminada por unos estudiantes anteriores fue el diseño y ensamble de los componentes de la máquina; la segunda etapa y la concerniente a este proyecto de grado es la puesta a punto y realización de corridas pruebas para entregarla a EMAVI en perfecto funcionamiento. Al inicio

de esta etapa se contaba con todos los componentes pero faltaba la programación general del equipo y las conexiones, es decir todo lo concerniente a la operación de la cámara como la parte de control electrónico, el software y un manual de instrucciones.

A continuación se detallan todos los componentes con los que cuenta actualmente la cámara ambiental del CITA, algunos de ellos como la bomba de vacío, el compresor, el humidificador, los sensores, el software y los controladores fueron entregados en la primera etapa del proyecto sin estar operando para su posterior programación, conexión e instalación; los demás ya estaban listos a funcionar:

3.1. SISTEMA DE SIMULACIÓN

- **Variaciones de presión.**

Producción de vacío: Se logra con una Bomba para vacío (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) rotativa de paletas modelo AI-1000, esta alcanza una potencia de 1,5 HP a 1750 rpm, una presión absoluta de 20 mmhg (con eyectores se pueden obtener presiones de hasta 5mmhg), con caudal de 12 pies cúbicos por minuto, con temperatura máxima de gas aspirado de 60°C con una conexión a succión de 1" y 75 dB de ruido. Para la lubricación de este equipo se recomienda un aceite industrial monogrado ISO 46 de base tipo II para extender los periodos de cambio y alargar la vida útil de la bomba.

Figura 19. Bomba para vacío.



Aumento de presión: Se realiza con un compresor (Figura 20) de una etapa marca UNO AIR automático, de trabajo pesado tipo industrial. El cabezote tiene un pistón en línea con tres anillos (dos de compresión y uno barredor de aceite). Consta de canales de ventilación, manómetro, válvula de seguridad. Con registro de salida de 100 libras y tanque con capacidad de 13 gls de almacenamiento alcanza una máxima presión de 80 psi. Tiene un motor marca KTC de 1/2 HP a 1730 rpm con potencia de 0,37 Kw montado sobre rodamientos y una válvula proporcional de 4 a 20 mA con rango de 0,5 a 10 bar. Para la lubricación de este equipo se recomienda aceite para motor monogrado SAE 40 sin detergentes.

Figura 20. Compresor.



- **Variaciones de Temperatura.**

Incremento de Temperatura: Se logra con el calentamiento de dos resistencias tubulares rectas (Figura 21) de igual longitud, colocadas en las paredes laterales de la cámara.

Figura 21. Resistencia tubular recta.



Disminución de temperatura: Se realiza con un congelador de aire forzado de 17 pies³ de capacidad y motor de 1/3 HP. La estructura mide de frente 1,80 m, fondo 0,70 m y alto 0,80 m. La temperatura mínima es de -5°C teniendo en cuenta que desde la temperatura ambiente se demora aproximadamente 60 minutos en alcanzarla. Contiene paredes con aislamiento en poliuretano inyectado a máquina con densidad 35 Kg/m³ y 4 cm de espesor. Acabados interior y exterior en lámina galvanizada calibre 24 con Pintura a base de poliuretano, aplicada con base acrílica.

▪ Variaciones de Humedad.

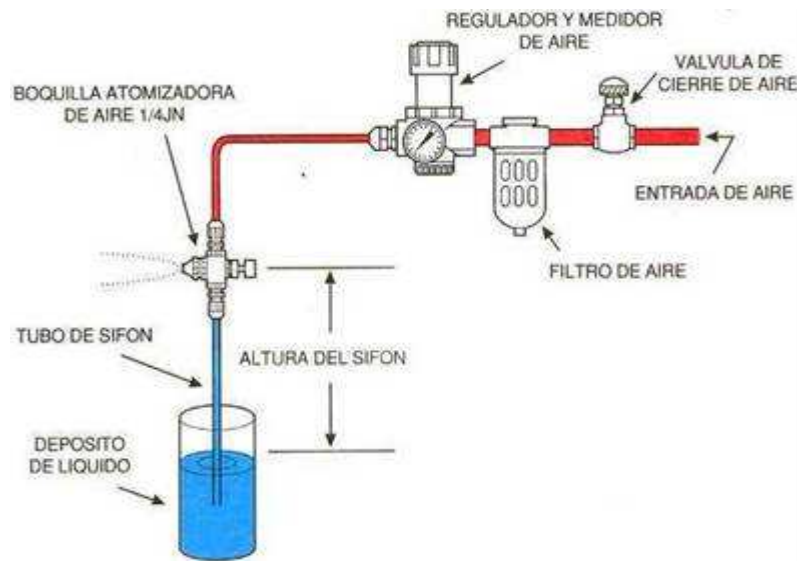
Humidificador: El sistema de suministro de humedad (Figura 22) esta dado en conexión de sifón ya que el depósito de líquido se encuentra en el fondo de la cámara. La aspersión se hace con una boquilla en bronce niquelado atomizadora de aire con capacidad de 0,49 a 280 l/h y un conjunto de aspersión SUF1 que es el variador para obtener las diferentes condiciones de Humedad, además de un regulador de presión. En la Figura 23 aparece una vista general del equipo humidificador

Figura 22. Vista del tanque y válvula aspersora.



Filtro: Se tiene un filtro manual para drenaje de caudal aproximado de 23,58 l/s a 6,9 atm. Este es para eliminar los contaminantes sólidos y líquidos de las líneas de aire protegiendo el equipo de los efectos corrosivos de las simulaciones.

Figura 23. Vista general del equipo humidificador.



3.2 SISTEMA DE CONTROL

Censor de Temperatura: Es un transmisor Marca Rixxen modelo THR 300 (Figura 24) con salida de 4 a 20 mA, longitud de bulbo 6cm, longitud del censor de 50mm. Para medir la humedad el principio es capacitivo y para la temperatura es PT100A.

Figura 24. Censor de Temperatura y Humedad Relativa.



Censor de Presión: Es un transmisor de la serie PTB 100^a (

Figura 25) de barómetros análogos marca Vaisala. Los rangos de operación que maneja son entre -40 y 60°C , en un ambiente de humedad de NO condensación y mide desde 800 hasta 1060 hPa.

Figura 25. Censor de Presión.



Controladores: Para esta aplicación se utilizaron los reguladores de procesos programables CAL Controls 9500P, los cuales convierten la entrada lineal de 4-20mA de corriente en voltaje mediante el uso de un resistor interno. Ver .

Figura 26. Panel de control.

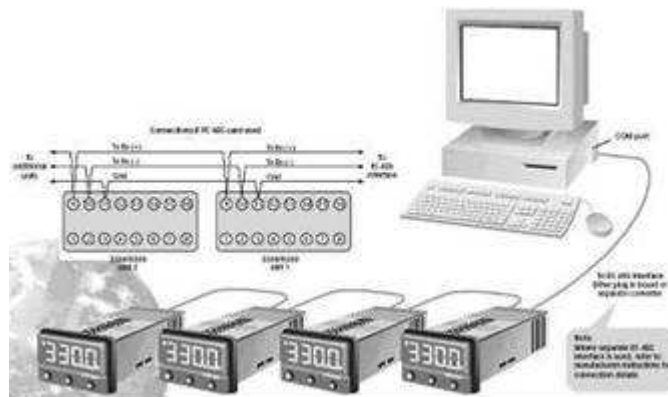


Comunicación: La conexión y transferencia de datos se da por la utilización de un protocolo de comunicación MODBUS RTU () donde la señal de voltaje diferencial leída por la conexión RS232 es convertida a RS485 para ser identificada por el Host del PC a una distancia de hasta 1200 metros.

Software: Para crear un registro y adquisición de datos mediante el sistema CAL controls, es necesario utilizar el software CalGraphix profesional y el Labview student versión 7,0, como herramientas para visualización del proceso. Este es un software gráfico basado en Windows, designado para la supervisión por PC de los controladores de modelo CAL 3300 y 9300. Brinda autoajuste en las variables de control (PID), y ofrece la capacidad de ajuste

remoto, configuración del instrumento, clonar, salvar y recuperar los parámetros del instrumento de los archivos, junto con la carga y parametrización en tiempo real.

Figura 27. Comunicación RS485.



3.3 PUESTA A PUNTO

La puesta a punto comienza con la lectura del documento anterior de diseño y construcción de la cámara para conocimiento del equipo a trabajar. Posterior a esto se verifican el funcionamiento de cada uno de los componentes: al interior de la cámara la lámpara de luz fluorescente, el ventilador, el congelador y las resistencias funcionan perfectamente, todos tienen su respectivo interruptor en el panel de control de la cámara; los sensores de Presión y Temperatura – Humedad Relativa se encuentran también ubicados en el interior de la cámara pero desconectados. El panel de control sólo cuenta con un CAL Controls, el superior correspondiente a la temperatura. No hay software instalado, ni computador para operar la cámara. Para los equipos exteriores la bomba de vacío se encuentra conectada y funcionando a diferencia del compresor que no tiene conexión con el humidificador.

El paso siguiente fue la parte de control de la maquina, la cuál se demoro por no tener todos los controladores comprados al tiempo, pasados unos meses con la ayuda de un ingeniero de la empresa Metro Instruments se hace la instalación de los dos controladores faltantes para las variables de presión y humedad relativa, la conexión de estos a sus respectivos sensores, el montaje del protocolo de comunicación de la cámara con el computador y la instalación de un software para monitoreo de las simulaciones. El ingeniero apoyo para esta labor deja funcionando supuestamente la cámara perfectamente tomando registro de temperaturas, presiones y porcentaje de humedad relativa del ambiente y mostrándolas en tiempo real el computador.

Con la plena seguridad del trabajo realizado y la confianza del optimo desempeño de los equipos se empieza la fase de mantenimiento de las

condiciones con la manipulación de las variables ambientales para proceder hacer la primera corrida de prueba con probetas de aluminios y así dar visto bueno al funcionamiento de la cámara; la cual arroja varios errores.

El primero de ellos se detecto un día de mediciones cuando la humedad relativa después de estar simulando ambientes muy fríos y luego muy calientes se dispara por encima de un increíble 300%. Con la variación de estas misma condiciones se opera la cámara tratando de mermar este indicador sin obtener resultados, finalmente el equipo es apagado. Otro día de pruebas la cámara se encuentra midiendo otra vez dentro de los rangos normales, esta vez simulando ambientes de temperaturas altas como el caso de la base ubicada en el departamento del Atlántico se presenta otro inconveniente, esta vez antes de alcanzar los 40°C de temperatura el recubrimiento interior en poliuretano inyectado de 35Kg/m³ y 4cm de espesor material de las compuertas de la cámara se ampolla por efectos del calor interior (Figura 28). Este imprevisto obliga a apagar las resistencias y abrir las compuertas para liberar calor, posterior a esto se dispara nuevamente la humedad relativa por encima del 600%.

Figura 28. Efecto de la temperatura.



Con este último suceso se comprueba que no se tiene una adecuada operación de la cámara y se sospecha inicialmente del mal funcionamiento de los sensores en este caso el Rixxen, ya que, específicamente la pérdida de propiedades del poliuretano por efectos de una temperatura de 40°C, no es

normal. Por lo que se creyó entonces que la temperatura real en ese momento de prueba debía ser mucho mayor a los 40°C reportados por el controlador. Esta hipótesis se basa en que son precisamente las mediciones de temperatura y porcentaje de humedad relativa correspondientes a un solo dispositivo las que están fallando.

Con los inconvenientes presentados en las inconsistencias de las mediciones y la necesidad de poner a funcionar el equipo, se recurre a la ayuda de un profesor de control, ya que se hace inminente la colaboración multidisciplinaria para resolver los inconvenientes con los dispositivos y la obtención de los resultados requeridos.

Es así como con ayuda de este profesor se inicia una evaluación del ciclo completo de funcionamiento sensores – controladores -software para detectar que parte del sistema de captura de datos es la que está fallando. Primero se analiza la operación del sensor Rixxen, como no se cuenta con un manual del dispositivo se recurre a Internet para encontrar las especificaciones técnicas y planos de conexión del producto. Al parecer todo está bien, posterior se destapa el panel de control para verificar las conexiones de los sensores con los CAL controls, donde se encuentran una serie de inconsistencias. Con la seguida interpretación del manual de los controladores se detecta que estos no son compatibles con la tecnología del Rixxen. La pregunta es como estaban trabajando, resulta que el ingeniero que hizo la conexión tenía simulado un termopar con resistencias lo que hacía que la lectura fuera un número simulado y por ende no una medición real susceptible a las variaciones que el medio presentaba. Esta situación engañosa de lectura de datos la teníamos tanto con el controlador de temperatura como con el de porcentaje de humedad relativa respectivas al trabajo del dispositivo Rixxen, quien de fábrica viene para ser conectado al lector como una PT100 en humedad relativa a diferencia del controlador que recibe la señal como termopar. El problema entonces era con el controlador, como el proveedor si conocía los dispositivos que se tenían para tomar las mediciones antes de la instalación de sus productos asesora y vende esos controladores?

Ahora la solución que se toma por motivos de economía es sustituir temporalmente el sensor Rixxen que en un solo dispositivo medía inicialmente temperatura y porcentaje de humedad relativa por una termocupla para la temperatura y un dispositivo artesanal que nos ayude con la humedad, mientras se logra hacer la adecuada conexión del Rixxen.

Otro inconveniente fue la comunicación RS al computador que al parecer también estaba mal hecha, pues el dato de temperatura nunca fue leído por el software, por lo que se procedió entonces a identificar la falla. La sorpresa fue encontrar un convertidor innecesario, colocado por el ingeniero anteriormente mencionado, supuestamente convirtiendo una señal SR232 enviada por los controladores al computador en RS485, cuando esto no era necesario ya que

en el manual de los controladores dice claramente que vienen para trabajar con señales SR485. Se procedió entonces con la corrección de la conexión.

Como valor adicional agregado a la tecnología con la que se recibió la cámara se obtuvo la automatización, con la cual no se contaba en un inicio, haciendo por ejemplo que los dispositivos se desconecten solos al alcanzar ciertos valores límites permitidos.

Inicialmente en el anteproyecto esta parte del trabajo se programo para dos meses, pero, la realidad fue otra, los varios factores anteriormente mencionados afectaron el cumplimiento del cronograma.

La cámara ambiental se entrega al CITA en perfecto estado de funcionamiento de todos sus componentes y en la capacidad de mantener ambientes controlados. Se entrega también un manual para la correcta manipulación del equipo donde se indica paso a paso la operación de la cámara para que esta pueda ser accesible a todo el personal de mantenimiento de la FAC (ver anexo A), quedando pendiente las corridas de prueba con la probetas de aleación de aluminio que se completaran seguidas a la entrega de este trabajo. Adicional en el presente proyecto se orienta a la óptima utilización de la cámara y en conjunto con los demás equipos del laboratorio del CITA, a las tareas de mantenimiento de la FAC, incentivando a la formación de una base de datos para implementar una ideología de técnicas predictivas en mantenimiento. Para esto se entrega también un formato de ficha técnica de mantenimiento (ver anexo B), donde se enseña a realizar un estudio científico que lleve al oportuno análisis de las causas de las fallas en eventualidades aeronáuticas, logrando con esto un aporte significativo a la operación de las aeronaves y seguridad de sus tripulantes.

4. CASOS DE ESTUDIO SOBRE ANÁLISIS DE FALLAS CAUSADAS POR EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN COMPONENTES AERONÁUTICOS

Toda Aeronave sin excepción está sujeta a cambios en sus parámetros que modifican el comportamiento para las cuales fueron diseñadas, estos pueden ser debidos a efectos de la temperatura, desgastes ocasionados por la fricción, el envejecimiento de sus componentes, etc, como el caso mostrado en la Figura 29.

Figura 29. Accidente octubre 4 de 1992



Un avión Boeing 747-200F de China Airlines chocó en Ámsterdam (murieron 4 tripulantes y más de 50 personas en tierra), la causa corrosión y fatiga que debilitaron los pasadores que sostienen las alas.

Queda claro entonces que todo los cambios en parámetros del sistema a zonas fuera de los límites de tolerancia especificados por el fabricante o límites establecidos de acuerdo a criterios de ingeniería, serán considerados como fallas. La rápida detección de fallas en sistemas puede ayudar a tomar acciones correctivas y de este modo reducir el daño potencial que esta falla puede ocasionar al sistema

Uno de los principales problemas del ingeniero de mantenimiento es predecir donde y cuando pueden ocurrir las fallas y las consecuencias de éstas siendo el mejor logro adelantarse a la ocurrencia de estas eventualidades evitando daños mayores. La idea de este proyecto es poner a disposición de la fuerza de mantenimiento de la FAC la cámara como herramienta predictiva de

solución a los tipos de fallas ocasionados por acción negativa del medio ambiente sobre las aeronaves.

Para este fin se considero necesario hacer una investigación general de casos mundiales documentados acerca de este tipo de fallas en el medio aeronáutico, encontrando como constante dos aspectos importantísimos y repetitivos también en la FAC; entre una de las causas principales de los accidentes en aviación se destacan los efectos medio ambientales (Corrosión) además de las fallas mecánicas (aviones que tienen una antigüedad de 15 a 30 años, como es el caso de las FAC).

A continuación se citan dos casos relevantes al proyecto que se esperan sirvan como consulta a los futuros operarios de la máquina y como ejemplo para la conformación de la base de datos.

4.1 CASO No 1

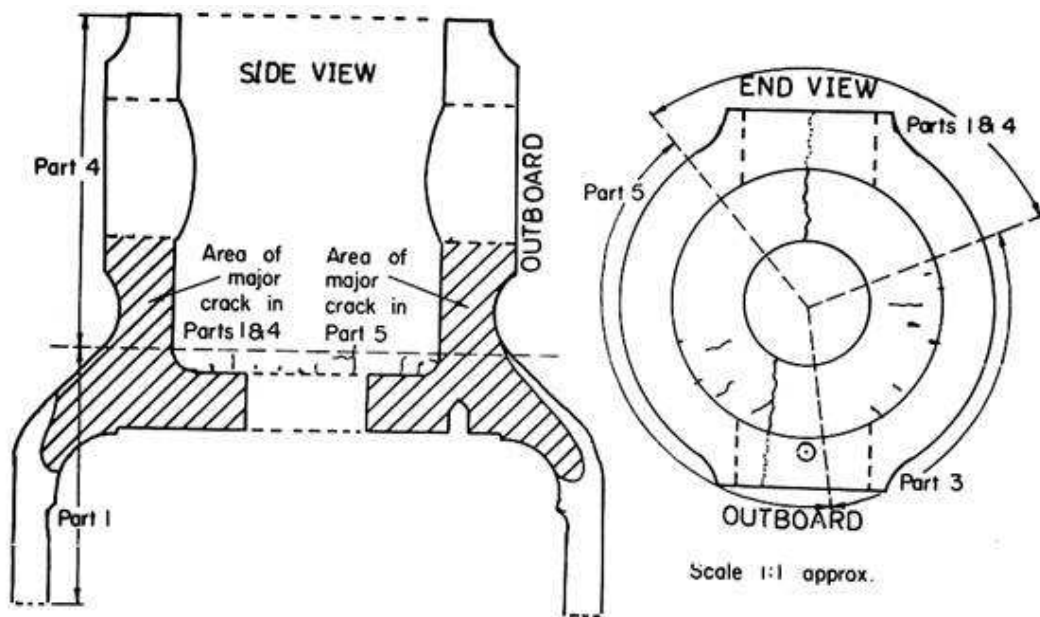
Agrietamiento en una aleación forjada de aluminio, material utilizado en trenes de aterrizaje de aeronaves militares y comerciales.

Este caso trata de dos trenes de aterrizaje completos de una aeronave con piezas fabricadas en aleaciones de aluminio forjado 2014, estos exhibieron agrietamiento durante ensayos de tipo no destructivo por lo que fueron examinados para determinar la extensión del daño y el tipo de grieta. Las grietas se encontraron en primera instancia en el diafragma y la pared ajunta entre el bulón y la arandela del diafragma, ambos de acero. Los análisis posteriores como los metalográficos y los ensayos de corrosión acelerada mostraron que las grietas se originaron por una falla de esfuerzos producidos por la **corrosión**.

- Antecedentes: Los Trenes de aterrizaje de aleaciones de aluminio forjado 2014 de la aeronave, muestran grietas de servicio durante ensayos no destructivos (tintas fluorescentes penetrantes y técnicas ultrasónicas).
- Palabras Claves: Aleación forjada de aluminio 2014; corrosión intragranular; fatiga por grietas corrosivas, engranajes de trenes de aterrizaje.
- Muestra Seleccionada: Se tomaron para el estudio los dos trenes de aterrizaje completos de aleación de aluminio forjado 2014 y sus numerosas terminaciones seccionadas, todas estas piezas fueron enviadas a examinar para determinar la extensión del daño y el tipo de grieta, las diferentes piezas fueron numeradas de la 1 a la 5 y las puntas de las dos trenes completos fueron seccionadas y separadas para numerarlas como la parte 6. Otra investigación más profunda reveló que las partes 1, 3,4 y 5 eran todas probablemente del mismo tren.

- **Examinación Visual de las Características Físicas Generales:** Las principales áreas afectadas fueron las de las secciones localizadas en la cercanía al punto de acople superior de unión de las terminaciones de los trenes de aterrizaje hechos de aleación de aluminio forjado, las medidas estaban aproximadamente en 1040 mm (41 in) de largo y 150 mm (6 in) de diámetro. El área crítica de las grietas es mostrada en la Figura 30.

Figura 30. Grietas en el tren de aterrizaje.



Las principales grietas en partes 1, 4 y 5 fueron abiertas mediante apropiados cortes y golpes de impacto para tener las adecuadas secciones de las vistas. Estas fracturas abiertas son mostradas en la Figura 31 (partes 4 y 1), en las cuales se observan grietas continuas; en la Figura 32 se muestra grietas abiertas de la parte 5. En cada una de las partes, un lado de la fractura fue limpiado antes de tomar la foto para efectos de comparación. La proximidad de la localización de estas grietas y la relación entre varias de las partes son mostradas en la figura, la que también muestra algunas de las muchas pequeñas grietas pasando al otro lado de las secciones.

A la parte 3 se le practicaron cortes calibrados y una limpieza parcial para las pruebas de ultrasonido Figura 33. El daño mecánico en forma de indentaciones del diafragma y las manchas negras, aparentemente causadas por corrosión, son claramente visibles. En todos los casos, esta corrosión interior fue desarrollada en el área expuesta entre el final del bulón de acero insertado y el borde de la arandela de acero debajo de la tuerca que sostiene el tubo del pistón.

Figura 31. Grietas abiertas en partes 4 y 1.

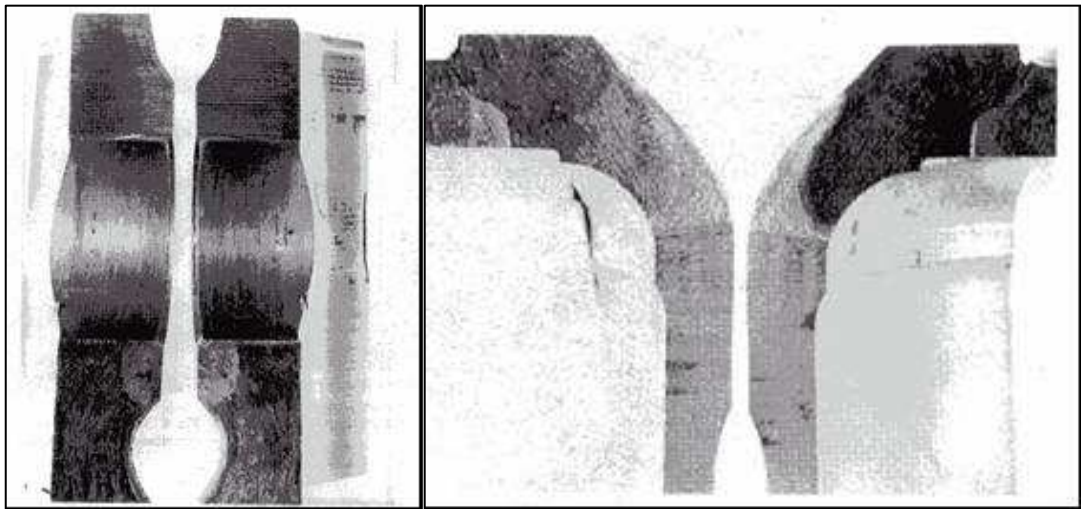


Figura 32. Grieta abierta en parte 5 y daño mecánico en parte 3.

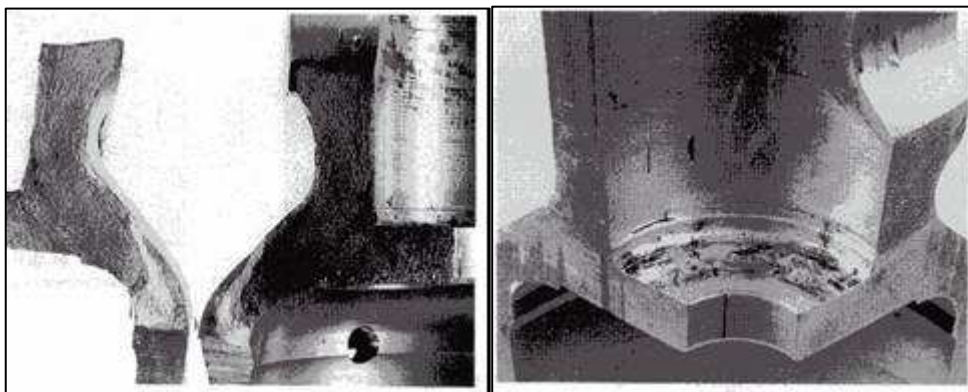
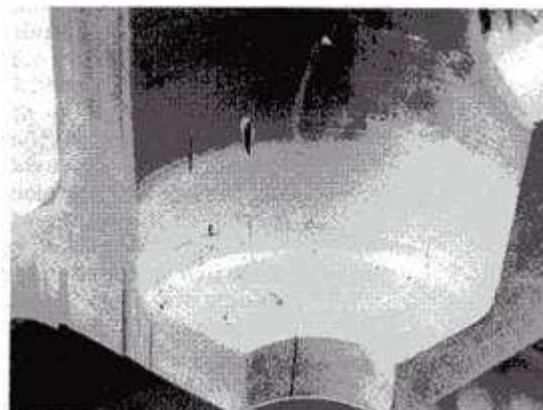


Figura 33. Parte 3 después de limpiar.



La parte 2 mostró haber sido reprocesada, la prueba posterior de ultrasonido mostró que esta tenía una larga grieta en forma de circunferencia, las tintas penetrantes fluorescentes no revelaron la grieta porque estaba efectivamente cubierta y arreglada con pintura cromada. El diafragma central fue maquinado por fuera de esta pieza para exponer la grieta en mejor detalle y fue vista a la mitad a lo largo del eje longitudinal para permitir una inspección más detallada.

La Figura 34 es una vista general del área fisurada en la parte 2, mostrando las marcadas grietas en forma de circunferencial y las grietas radiales que, presumiblemente, se propagaron desde o dentro del diafragma. La Figura 35 muestra como la cercanía de las grietas circunferenciales corresponde al centro del bulón de metal flojamente insertado.

Figura 34. Área fisurada en Parte 2.

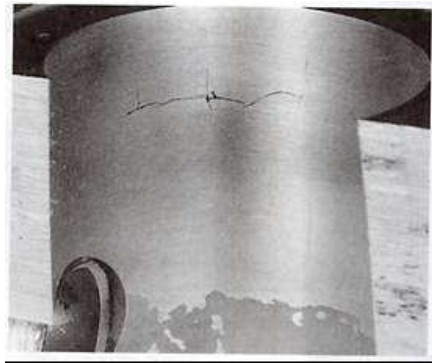
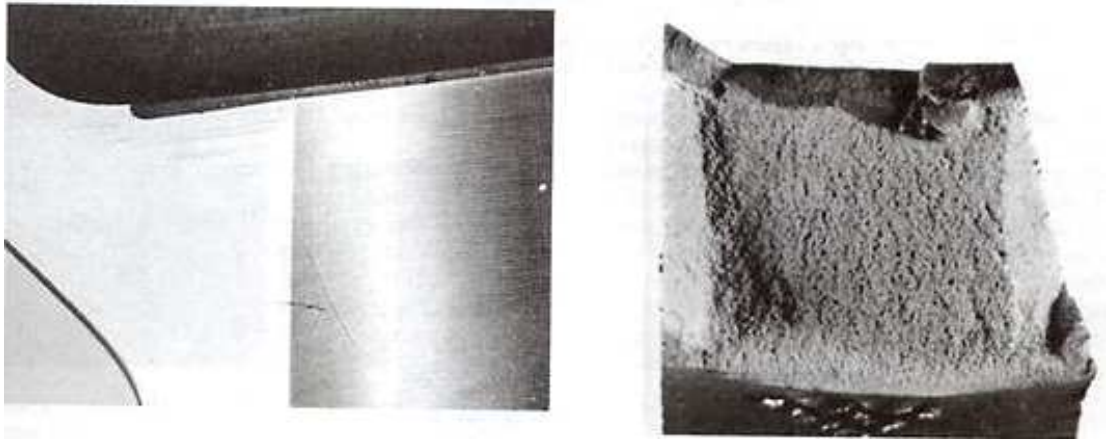


Figura 35. Centro del bulón.



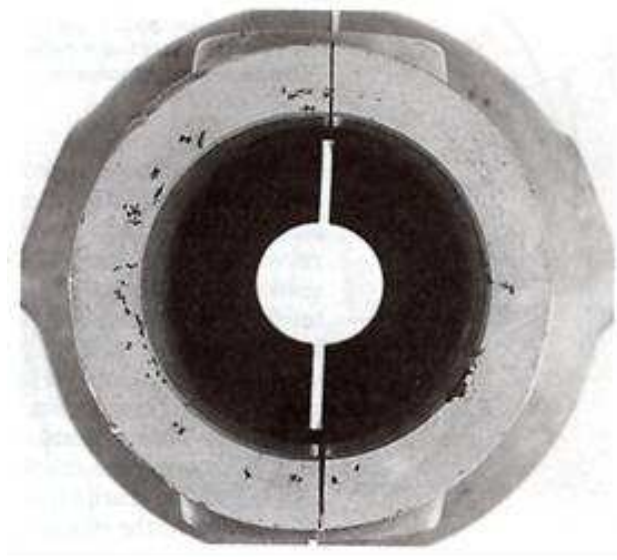
La Figura 36 muestra la bifurcación natural al final de la grieta e indica su profundidad en la pared y como la grieta circunferencial fue deliberadamente rota y abierta para la buena vista de la sección, indicando la profundidad general de la penetración.

Figura 36. Análisis de grietas en parte 2.



La parte 6 exhibió un número de grietas en la junta del lado de la pared y el diafragma (como en la parte 3, excepto que las grietas aparecen más anchas y con más bifurcaciones) como antes, el área interna entre la arandela y el bulón mostraron evidencias de daño mecánico y ataque corrosivo. La marcada corrosión por pitting sobre la superficie externa era también visible cerca de los hoyos roscados en el cuerpo, el cual contenía residuos de material (desgaste del acero) en una franja estampada correspondiente a un cable sujetador de acero (abrazadera) entre los hoyos y en la punta final del cilindro. Este ataque corrosivo es mostrado en la Figura 37.

Figura 37. Ataque corrosivo en parte 6.

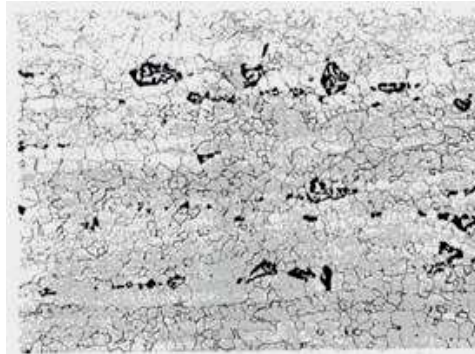


▪ **Resultados de Ensayos:**

Metalografía

Análisis Microestructural: El grano estructural de la Forja es de alguna manera no uniforme, pero en general estaba bien y equiaxial como se muestra en la Figura 38. Esto pudo ser debido a una recristalización más completa de la aleación como resultado de algún tipo de trabajo durante la forja.

Figura 38. Grano estructural parte 6.



Cualquiera sea la causa el efecto podría, sin ninguna duda, ser beneficioso al tender a reducir la Anisotropía del material entonces la resistencia a la fatiga por corrosión podría ser similar en todas las direcciones .

El material extruido de esta composición es conocido por ser muy “anisotropico” con respecto a la resistencia de esfuerzos corrosivos, siendo mejor en dirección longitudinal y peor en la corta dirección transversal.

Demarcación de los orígenes de las grietas: Cerca de su origen en la superficie, muchas de las largas grietas eran muy anchas como se observa en la

Figura 39. Presumiblemente debido a la corrosión secundaria como un resultado de la creación de un medio corrosivo. En todos los casos, las grietas mostraron unas ramificaciones que son típicos defectos de forma en aleaciones de aluminio. La propagación de las grietas ocurre también en distintas direcciones en la misma región de la pieza (grietas circunferenciales y radiales en parte 2).

Morfología de la corrosión: Todo el agrietamiento y la picadura fue primeramente intergranular y efecto típico de los ataques corrosivos en estas aleaciones, en especial la parte 6 tuvo numerosas áreas de la superficie picadas.

Figura 39. Grietas parte 5.



Una sección a través de una de estas piezas mostró corrosión intergranular típicas de estos tipos de aleaciones en condiciones libres de esfuerzos Figura 40.

La presencia de esta forma de ataque es indicadora de la agresiva naturaleza del ambiente. Todas las demás grietas examinadas fueron típicas del ataque por esfuerzos corrosivos en aleaciones Figura 41.

Figura 40. Corrosión Intragranular.

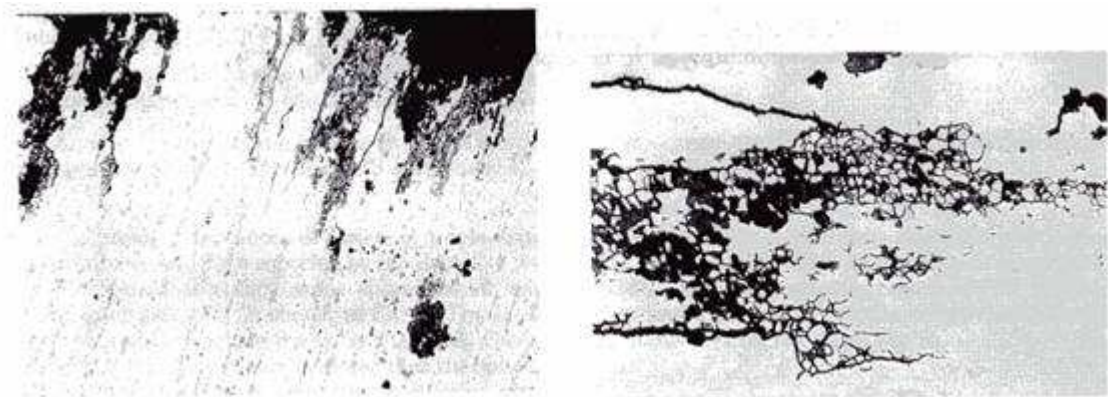
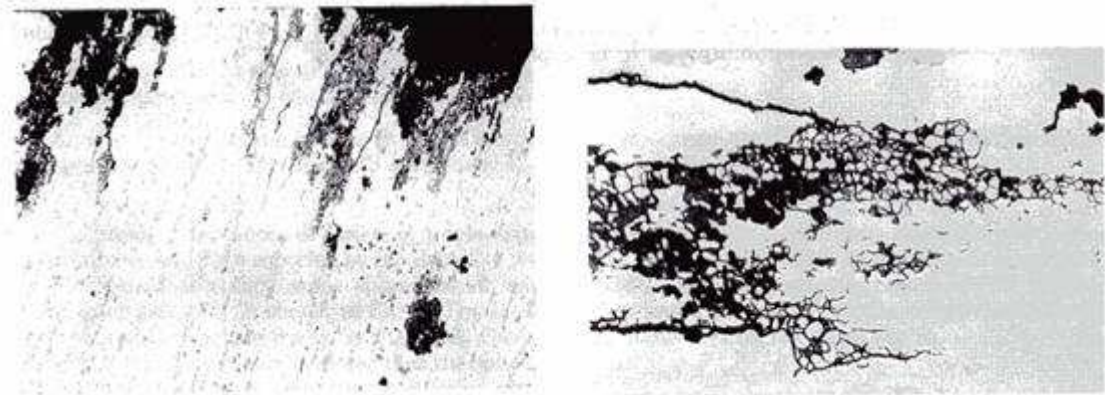


Figura 41. Grietas por esfuerzos corrosivos



- **Análisis Químico**

Material: Se encontró que las forjas fueron manufacturadas de la aleación 2014 (ASTMB247) en la condición T6, especificación conocida de este material.

- **Propiedades Mecánicas**

Dureza: La dureza BRINEL de 130 HB indico que la aleación forjada estaba en condición T6, como lo requiere la especificación (ASTM B247).

- **Pruebas de simulación**

Como es conocido las condiciones de los tratamientos térmicos pueden afectar la susceptibilidad de este tipo de aleación a sufrir corrosión. Las especificaciones militar estándar MIL-H-6088D de tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio, cuentan con una prueba de corrosión acelerada para determinar los efectos de los tratamientos térmicos.

Secciones de cada una de los trenes fueron sometidas a este examen de simulación. Adicionalmente una pieza de la parte 6 fue tratada térmicamente nuevamente por 90 minutos y a 505 °C, templada con agua fría, envejecido a 170 °C por 12 horas y luego probada en el examen de corrosión. Examen de las secciones hechas en estos ejemplares mostraron que todas tenían corrosión intergranular a la máxima profundidad cercana a los 0.25 mm. Aparentemente no había diferencias en como se habían recibido las muestras y la pruebas vueltas a tratar térmicamente. Esto demuestra que la susceptibilidad del material a la corrosión no tuvo relación alguna con un inadecuado tratamiento térmico.

▪ **Conclusión**

El análisis metalográfico y la prueba de corrosión acelerada demostraron que las aleaciones son susceptibles a la corrosión intergranular, es por este motivo que los esfuerzos producidos por efectos corrosivos eran de ser esperados. El origen de las numerosas grietas pareció tener cuna en la poca resistencia que el material pudo ofrecer a los efectos de los esfuerzos corrosivos, además posteriormente se ensancharon aún más por otro ataque corrosivo subsecuente.

4.2. CASO No 2

Falla de un engranaje accionador – accesorio de maquina:

En un ensamble de un eje y un engranaje conductor (accesorio de máquina ATAR) de una aeronave MIRAGE III de la Fuerza Aérea Australiana (RAAF) se presentó un falla durante el aterrizaje al prenderse el ensamble mencionado.

Al desmontar la maquinaria esta reveló que el sitio de acople del engrane con el eje era el lugar de origen de la falla.

Una examinación visual y de baja resolución microscópica de las partes comprometidas como lo son el engranaje accionador y el eje ranurado (16 NCD 13) mostró evidencia de severo desgaste por **corrosión por frotamiento (fretting)**; además pruebas de este desgaste fue la viruta que se observo sobre las estrías del acople del engranaje. Este desgaste por frotamiento también fue observado sobre la cara del eje adyacente a las estrías y sobre los espacios de los dientes del engrane, llegando a la conclusión de que las ranuras habían fallado por severo desgaste debido al frotamiento.

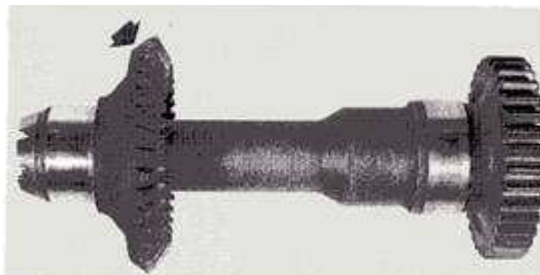
Pruebas adicionales como: una inspección metrológica del eje, el engrane , el anillo de soporte ; la examinación metalográfica de una sección del eje, el análisis químico del material del eje (16 NCD 13) y pruebas de dureza de una muestra del material de la unión concluyeron, que el desgaste había sido causado por el incorrecto maquinamiento de las ranuras del eje; quienes no permitían la correcta localización de la tuerca aseguradora del engranaje contra este.

- **Aleaciones:** Acero al níquel – cromo – molibdeno 16 NCD 13.
- **Antecedentes:** La falla de un ensamble de un eje y un engranaje conductor (accesorio de la máquina del tren de engranajes ATAR) de una aeronave MIRAGE III de la Fuerza Aérea Australiana (RAAF) que durante el aterrizaje provocaron una llama.

- **Aplicaciones:** El deteriorado ensamble (eje ranurado y el engrane conductor) forman una parte integral del ATAR, accesorio accionador de la máquina del tren de engranaje. El tren de engranaje provee potencia de la máquina principal a los demás accesorios de la máquina, incluyendo las bombas hidráulicas y el sistema eléctrico. Porque sólo una máquina y un sólo accesorio conductor del sistema están hechos a la medida de la aeronave MIRAGE III, es que la pérdida de este accesorio conlleva a la falla y esta puede resultar en pérdida de la aeronave.
- **Principales circunstancias de la falla:** Durante el aterrizaje de un vuelo de rutina, ocurrió una llama en el motor. La aeronave fue recuperada a salvo, el desmantelamiento posterior del motor revelo que el accesorio conductor había fallado.
- **Desempeño de las otras partes en el mismo o similar servicio:** La RAAF no había reportado anteriores incidentes de falla de accesorios en el engranaje conductor.

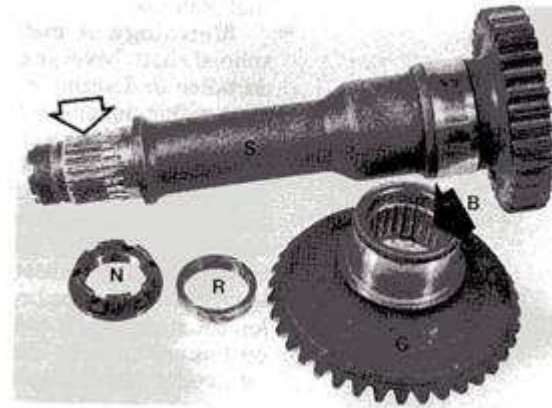
El accesorio que falló es mostrado en la Figura 42, El engrane estaba disponible para rotar libremente sobre el eje. El desensamble de los componentes reveló que las ranuras del eje habían fallado completamente por desgaste severo de frotamiento.

Figura 42. Accesorio de la maquina que falló.



Estas ranuras habían sido plateadas con una aleación de plata para proveer precisamente resistencia a la **corrosión por frotamiento**. El engranaje es normalmente sostenido por el eje, por una tuerca especial, por el anillo de soporte y por otra tuerca aseguradora del mecanismo (la cual no está disponible para examinación)..

Figura 43. Componentes del accesorio.



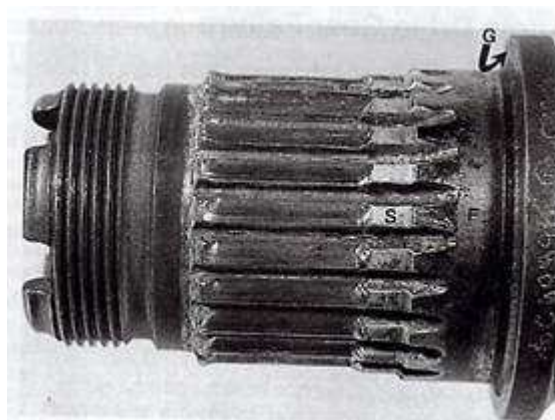
▪ Procedimientos pruebas y resultados

Exámenes de Superficie

Microscopia de Baja Intensidad: Este examen detallado de las ranuras del eje reveló la evidencia de desgaste por frotamiento por la presencia de viruta. Figura 44.

Las ranuras del acople del engrane habían fallado de manera similar también. El daño por frotamiento fue observado también sobre la cara adyacente del eje a las ranuras y sobre los dientes del engrane. Nuevamente, viruta similar fue encontrada sobre las porciones de unión del engrane.

Figura 44. Desgaste por frotamiento.



El anillo soporte de la Figura 45 mostró evidencia de identaciones igualmente espaciadas en la cara interior de la circunferencia. El ancho y el espaciamiento de estas identaciones correspondieron aproximadamente al ancho y los espaciamientos de las ranuras sobre el eje.

Figura 45. Evidencia del desgaste.



Otro examen de las puntas de las ranuras del eje mostró la unión de identaciones en la parte plateada (Figura 46), esta evidencia sugirió que el anillo soporte había estado en duro y constante contacto con las puntas de las ranuras cuando la rosca de retención del engrane, se hermetizo al ensamble, generando la discusión con la RAAF quienes confirmaron que, bajo normales circunstancias de operación el anillo soporte no debería hacer contacto con las ranuras del eje.

Figura 46. Examen de las puntas.



- **Metrología:** Una inspección metrológica del eje ranurado, el engrane y el anillo soporte fue la encargada de determinar cual de estos componentes estaba fuera de las especificaciones de dimensión. El anillo soporte y el engrane estaban dentro de las especificaciones; a diferencia , de la longitud de

las ranuras del eje (desde la cara colindante de arriba del engrane hasta e incluidas las puntas sesgadas de las ranuras) que era aproximadamente de 0.762 mm (0.03 in) más grandes que el máximo permitido por las especificaciones; este milimétrico incremento en la longitud de las ranuras del eje fue suficiente para permitir que el anillo soporte y la tuerca de seguridad entraran en contacto y fuerte rozamiento con las ranuras produciendo con esto un mal ajuste contra el engrane.

- **Metalografía:** Una sección del eje a través de las ranuras de manera perpendicular a la longitud fue tomada para una metalografía. Esta sección fue pulida y examinada en condiciones con y sin agua fuerte. La microestructura del material del eje fue templada martensiticamente, no se observaron características inusuales.

- **Análisis Químico:** El análisis químico de la muestra del material del eje indicó que este estaba conformado por la aleación de acero 16 NCD13 (normas francesas) especificadas para el eje.

- **Propiedades Mecánicas:** Dureza: Se le practico un examen de dureza a una muestra del material tomado de la parte de la unión, rindió un valor promedio de 41 HRC indicando un esfuerzo de tensión de aproximadamente 1300 MPA (190 ksi). Aunque la información con respecto a las propiedades especificas del material, no estaba disponible, los valores registrados son consistentes con la microestructura observada de este material en el eje.

- **Discusión** Las observaciones y los resultados de los exámenes practicados indicaron que el ATAR fallo por extremo deterioro en la porción del material correspondiente a la unión entre el engrane y el eje.

El caso es que mucho del torque generado por el ajuste de la tuerca fue consumido en el forzamiento del anillo soporte contra las puntas de las ranuras del eje, mostrando además que las estrías del eje habían sido incorrectamente maquinadas, impidiendo el correcto acople del ensamble del eje con las puntas de las ranuras el eje. Si bien pareciese que la tuerca podía ajustar en algún grado contra el engrane, es claro que la presión del engrane era insuficiente para prevenir el movimiento relativo de este con el eje. Consecuentemente el daño por el deterioro de los dientes de ambos componentes fue acelerado.

- **Conclusión y recomendaciones**

La falla del ensamble entre el eje ranurado y el engrane resultó del desgaste severo de este acople por efectos corrosivos de frotamiento (fretting), causado por el maquinado incorrecto de los dientes del eje.

- **Acción remedial:** Se recomendó que todos los accesorios del ensamble del eje y engranaje conductor aptos para máquinas ATAR en servicio con la flotilla MIRAGE de la RAAF fueron examinados, verificando el correcto

maquinado de los dientes del eje además de la realización de una modificación en los procedimientos de manufactura y ensamble.

Con los dos casos de estudio anteriores se muestra la manera correcta de documentar las fallas en las aeronaves, donde se tiene la descripción, imágenes, resultados de análisis entre otros como aspectos relevantes de la información, clave ya sea para acciones remediales o preventivas del mantenimiento.

5. MANTENIMIENTO EN LA FAC

Al igual que en la sección anterior de este documento la FAC ha tenido casos de corrosión en sus aeronaves, a diferencia de otras partes del mundo no se contaba con un registro de estos sucesos como herramienta para el mantenimiento. La finalidad de este proyecto esta en hacer de la cámara una herramienta de las tantas necesarias para consolidar un adecuado y estructurado plan de mantenimiento que tenga como ideología la prevención, con la utilización de la información recopilada de las experiencias mismas y la realización de pruebas y análisis que lleven a la práctica los conocimientos de la ingeniería.

5.1. CORROSIÓN EN LA FAC

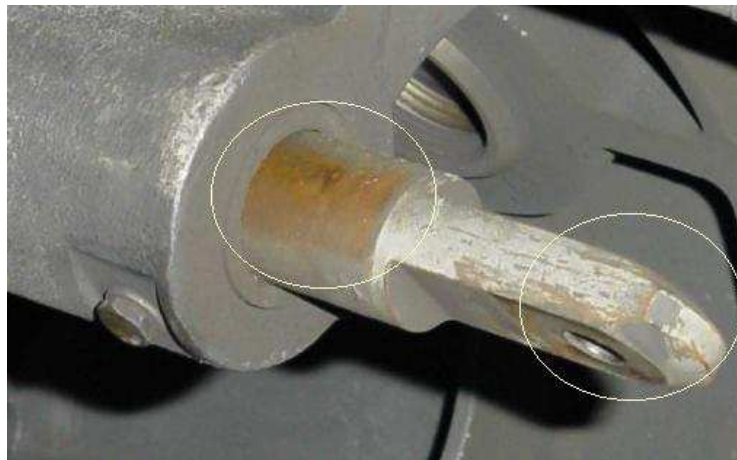
Un ejemplo de la imprecisión del programa de mantenimiento actual de la FAC fue el presentado en uno de los helicópteros El UH-60 Black Hawk (HELICOPTERO ARPIA 4125) mostrado en la fotografía de la Figura 47, el cual tuvo una falla por envejecimiento al presentar deterioramiento en varias de sus estructuras. La corrosión se ocasiono por residuos de materiales como polvo y material explosivo. Figura 48.

Figura 47. Helicóptero UH-60 BLACK HAWK



Lastimosamente solo se tiene el registro gráfico, pues falto la documentación de los hechos por medio del proceso investigativo y la realización de ensayos mecánicos como la simulación en la cámara ambiental, pruebas de dureza, metalografías, metrologías, entre otras.

Figura 48. Corrosión en piezas.



En las fotos se ve claramente como aparece la corrosión en los diferentes componentes como en los amortiguadores de la silla, compartimientos de los cohetes, juntas y en las celdas lanzacohetes donde se alcanza a ver el ataque corrosivo por picaduras. Figura 49.

Figura 49. Celdas lanzacohetes



5.2. MODELO DE FICHA TÉCNICA DE ESTUDIO PREDICTIVO DE MANTENIMIENTO

La correcta elaboración de una ficha técnica de estudio predictivo para la formación de una base de datos para empezar a implementar una ideología de mantenimiento predictivo en las instalaciones de la FAC, es la razón de ser de la puesta a punto de la cámara ambiental y demás equipos del laboratorio del

CITA enfocados a aplicar la ciencia y tecnología para colocar a la FAC a la vanguardia de las operaciones mundiales aeronáuticas de hoy en día.

A continuación se explica cada uno de los rubros que componen la ficha para que sean llenados de la manera correcta:

- **Resumen:** Descripción de la falla lo más detalladamente posible, para esto es importante que quede registro en la ficha de datos relevantes como el tipo de aeronave, el tipo de servicio, las condiciones de operación, todas las especificaciones técnicas del equipo posibles, datos de ubicación como fecha y lugar geográfico, además de mencionar posibles causas que se creen llevaron a la eventualidad.
- **Antecedentes:** Se deben citar los eventos similares al caso de estudio que se hayan presentado anteriormente, ya sea el mismo tipo de deterioro, la misma aeronave, la misma pieza, las mismas condiciones de operación, o demás datos en común que se puedan tener con otros estudios.
- **Palabras claves:** Se deben mencionar todas las palabras importantes referentes a las partes directamente involucradas en la falla, como lo son los elementos de máquinas, los materiales, el tipo de deterioro sufrido, etc, o términos técnico o científicos que se deban consultar.
- **Piezas seleccionadas:** Se deben listar todos los componentes o piezas que hacen parte del estudio, entendiéndose por estos las diferentes partes de las estructuras involucradas directamente en la falla. Posteriormente se debe numerar cada una y proceder a marcarlas como probetas: Probeta 1, 2, 3, n. Este punto es de vital importancia para el seguimiento de cada una de las piezas durante la totalidad del estudio, pues cada ensayo (simulación en la cámara, microscopia estructural, cortes, etc) arrojará información relevante a la probeta que deberá ser consignada de manera correcta para posteriores consultas. En el manual de operación de la cámara ambiental se indica como debe ser la marcación de las probetas. Se recomienda anexar fotografías de las probetas a estudiar.
- **Examen visual:** Antes de realizar cualquier ensayo es importante registrar que presenta la probeta a simple vista, averiguar las dimensiones y tolerancias recomendadas por el fabricante para cada una de estas piezas, para posteriores comparaciones.
- **Demarcación orígenes de grietas.** Si se presentan grietas a simple vistas marcarlas y medirlas.
- **Morfología de la corrosión.** Si la probeta presenta corrosión determinar que tipo de desgaste es.

- **Ensayos.** Cada una de las probetas debe ser analizada.
- **Metrología.** Medir la totalidad de las probetas y en todos sus planos.
- **Microscopia estructural.** Determinar el estado de las estructuras y granos de los materiales de las probetas.
- **Metalografía.** Constatar tipos de materiales, aleaciones y tratamientos térmicos.
- **Dureza.** Comparar las propiedades mecánicas de la probeta actual con las originales del material de la pieza.
- **Cortes.** Este ensayo sólo si es necesario, de ser así realizar cortes longitudinales o transversales para verificar penetración de las fallas.
- **Corrosión acelerada.** Simulaciones hechas en la cámara ambiental de las condiciones atmosféricas de los diferentes lugares geográficos a los que estuvieron expuestas las piezas.
- **Otros.** Ensayos como tintas penetrantes, ultrasonidos pueden ayudar en el ensayo. Si la pieza o estructura afectada esta en contacto directo con algún tipo de lubricación es recomendable analizar el estado del lubricante con una espectrofotometría, para detectar ppm de desgaste de otras piezas.
- **Resultados.** De cada uno de los ensayos practicados en el estudio es necesario anotar todas las observaciones y resultados obtenidos. Anexar cartas virtuales de la exposición de las probetas a los entornos simulados, y toda la información grafica posible como fotos imágenes digitales de la microscopía, etc.
- **Desempeño de otras piezas en el mismo o similar servicio.** Citar los componentes involucrados en el caso pero que no presentaron falla ni alteración de sus propiedades iniciales de fabrica. Discutir la posible causa.
- **Conclusión.** Con la información obtenida de los ensayos determinar las causas de la falla.
- **Recomendaciones.** Indicar las medidas preventivas a tomar para evitar este tipo de fallas conociendo la causa de la falla, informar a todo el equipo de mantenimiento de las acciones remediales y predictivas a tomar para este tipo de aeronave o piezas en particular.

Junto con la entrega formal de la cámara funcionando y el manual respectivo de operación, se entregó también el modelo de la ficha técnica de estudios predictivos a seguir por el grupo de mantenimiento. Ver anexos A y B.

6. CONCLUSIONES

Con el perfeccionamiento y la puesta en marcha del proyecto “Cámara Ambiental”, se logra un aporte científico y tecnológico, que permite el desarrollo de estudios de corrosión en componentes aeronáuticos, especialmente en estructuras, pieles y quincallería aeronáutica, el cual redundará en el fortalecimiento del área de mantenimiento predictivo de la FAC.

Los estudios investigativos propios del CITA que se desarrollaran en el área de corrosión se colocaran a disposición de técnicos, operarios, ingenieros, y cualquier otra persona involucrada en la operación de las aeronaves de la FAC, y de otras instituciones o empresas relacionadas con el campo aeronáutico, con lo cual se desarrollará la escuela del conocimiento en Colombia de corrosión en el campo aeronáutico.

La Cámara Ambiental es una herramienta de fácil manipulación útil en las prácticas actuales de mantenimiento, el manual de operación desarrollado es el ente que facilita dicha operación, el manual de operación describe de manera ordenada las pasos que se requieren para lograr un óptimo funcionamiento de la cámara y disponibilidad para todos lo interesados en realizar este tipo de estudios

En este proyecto se presenta temas de consulta en casos de fallas ocasionados por corrosión en las aeronaves por diferentes factores, los cuales sirven de guía para posteriores estudios en este campo.

Teniendo en cuenta la importancia la cámara en el mantenimiento predictivo, se desarrolló también un modelo de ficha técnica, con el cual se tendrá un registro de los estudios realizados en el laboratorio, con el fin de determinar las posibles fallas y diseñar oportunamente el plan de acción predictivo.

Durante el desarrollo del proyecto “Cámara Ambiental”, no solo se aplicaron los conocimientos teóricos adquiridos, sino que también, se realizo un trabajo multidisciplinario el cual me aporó conocimientos en control y electrónica y a su vez aprendizaje y sinergia con las otras ramas de la ingeniería.

7. RECOMENDACIONES

Durante la realización del proyecto se detectan algunos factores ya sea para mejorar o implementar en pro de la funcionabilidad y correcta manipulación de la cámara ambiental, entre ellos:

En el interior de la cámara se encuentra un orificio en forma de sifón correspondiente a la succión de la bomba para crear vacío, este está expuesto a partículas sólidas y demás contaminación que pueden presentarse durante los procesos de simulación o bien sea a el polvo en los largos períodos en los que la cámara no está siendo operada. Esta situación puede ser perjudicial al momento en que estas partículas sean succionadas por la bomba y pasen a tanque de almacenamiento, ocasionando daños y deterioro temprano del equipo. Para evitar esto se recomienda la adaptación de un filtro intermedio entre la conexión de la cámara con la bomba y sus constante monitoreo y limpieza para mantener la bomba ajena al paso de partículas.

Otro aspecto importante es que por la finalidad de la cámara que es la de simular ambientes altamente corrosivos, se recomienda cambiar el recubrimiento de las paredes internas de esta, ya que, actualmente están hechas de una lámina de acero galvanizado, material que al ser expuesto repetitivamente a estas extremas condiciones puede terminar presentando una marcada corrosión. Para evitar esto se recomienda colocar un recubrimiento en lámina de acero inoxidable para retrasar al máximo este fenómeno al igual que el constante monitoreo para el oportuno reporte de cualquier indicio de esta situación en las paredes de la cámara.

Para la realización de los estudios en la cámara se considera necesario también adaptarle un sitio para la colocación de las probetas en el interior de la cámara, ya que, actualmente estas tendrían que ser colocadas en el fondo de la cámara en contacto directo con el recubrimiento de las paredes de esta, lo que puede afectar el fenómeno que se quiere lograr con la simulación en las piezas. Se recomienda entonces la adaptación de una rejilla de material no metálico donde las probetas de estudio puedan quedar suspendidas y bien situadas a la altura de las resistencias y el aspersor para obtener los resultados de corrosión esperados.

Como aspecto general y adicional la puesta a punto de la cámara ambiental se recomienda hacer una adecuada transmisión de la información a los grupos de mantenimiento de la FACI, así como una campaña de sensibilización hacia la investigación, para la adecuada utilización no sólo de la cámara ambiental, sino de los demás equipos existentes en el laboratorio del CITA. Paralelo a esto se recomienda también la identificación, marcación y adecuada localización de todos los equipos del laboratorio para incentivar y acostumbrar a los militares a

la utilización de su laboratorio y concientizarlos de la importancia de aplicar los conocimientos de la ingeniería a la práctica de sus tareas diarias.

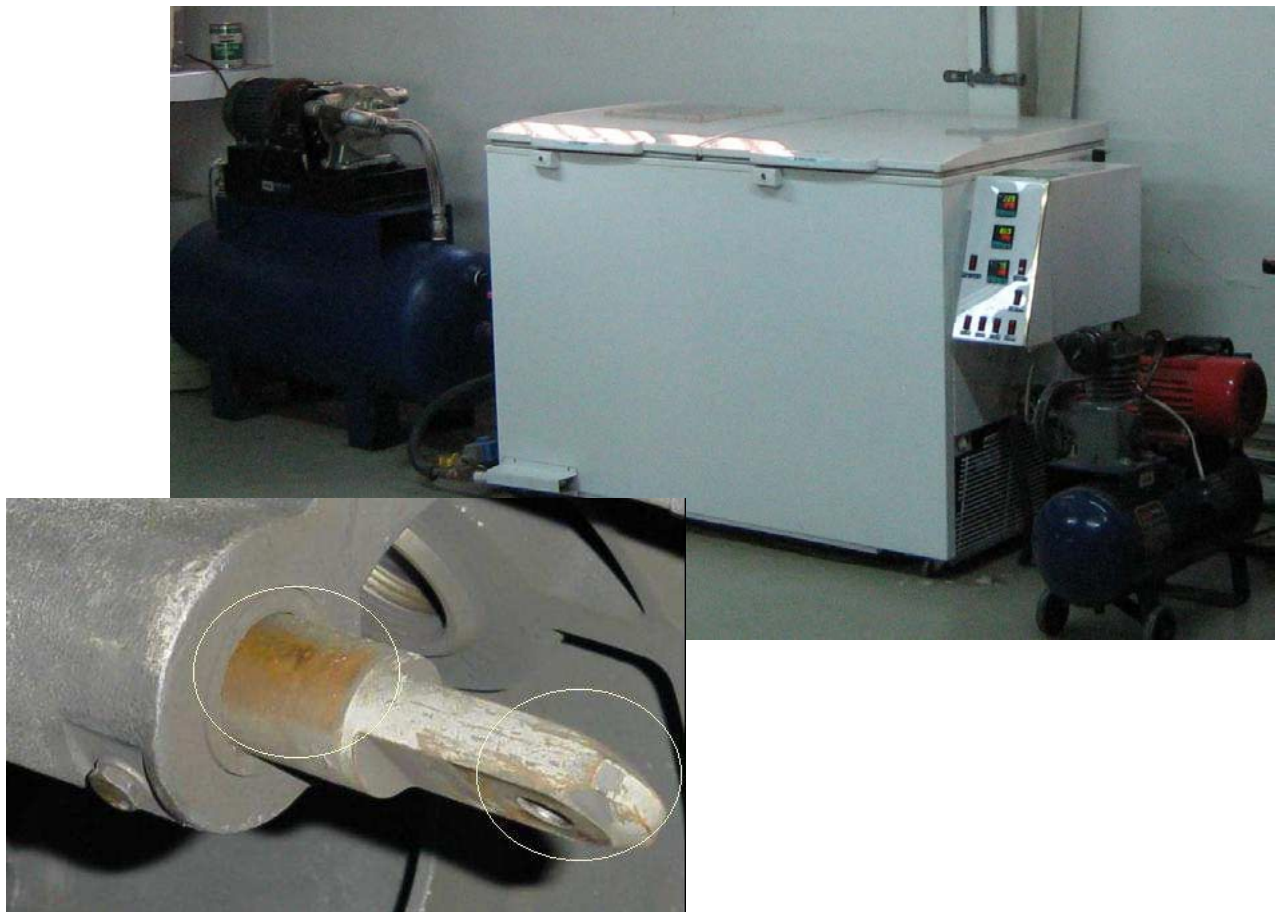
BIBLIOGRAFÍA

Handbook of Case Histories in Failures Analysis. Munich: ASM International, 1992. 180 p.

Handbook of Case Histories in Failures Analysis. Munich: ASM Internacional, 1993. 210 p.

ROBERGE, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. London: Ed. McGraw-Hill Handbook,. 2000. 780 p.

MANUAL DE OPERACIÓN CÁMARA AMBIENTAL



MANUAL DE OPERACIÓN

CÁMARA AMBIENTAL

INDICE

1. DESCRIPCIÓN
2. COMPONENTES
 - 2.1. Sistema de Simulación
 - 2.2. Sistema de Control
3. ASPECTOS GENERALES
4. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN
5. REGISTRO DE DATOS
 - 5.1. Marcación de Probetas
 - 5.2. Cartas Virtuales
6. MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS
 - 6.1. Lubricación
7. SEGURIDAD
8. ANEXOS

1. DESCRIPCIÓN

La cámara ambiental es una herramienta del mantenimiento predictivo que mediante la simulación de las diferentes condiciones atmosféricas logra recrear el ambiente real al que están expuestas las pieles y estructuras de las aeronaves. Con la exposición de piezas y componentes hechos con diferentes materiales y aleaciones a un ambiente controlado se puede estudiar el curso natural de la corrosión y sus efectos en dichos elementos.

La cámara esta en capacidad de imitar variables ambientales

como temperatura, presión y humedad relativa, y con la variación de estas simular los ambientes de los diferentes lugares geográficos donde operan las aeronaves de la FAC. El funcionamiento de la máquina esta constantemente monitoreado por un software de visualización en tiempo real, así de manera continua durante las simulaciones efectuadas todas las variables están siendo controladas y registradas.

Figura 1. Vista general del equipo.



2. COMPONENTES

2.1. SISTEMA DE SIMULACIÓN

Variaciones de presión.

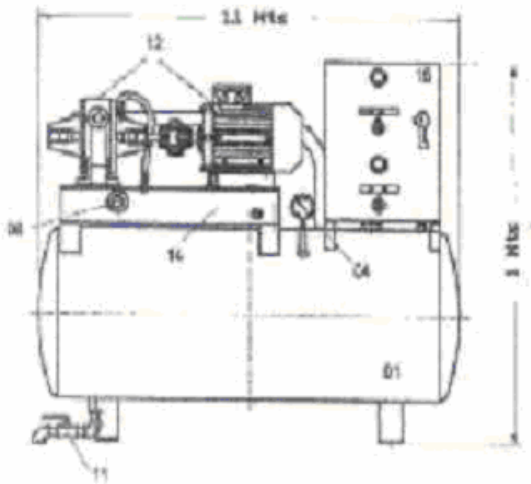
- Producción de vacío: Se logra con una Bomba para vacío rotativa de paletas modelo AI-1000, esta alcanza una potencia de 1,5 HP a 1750 rpm, una presión absoluta de 20 mmhg (con eyectores se pueden obtener presiones de hasta 5mmhg), con caudal de 12 pies cúbicos por minuto, con temperatura máxima de gas aspirado de 60°C con una conexión a succión de 1" y 75 dB de ruido. Para la lubricación de este equipo se recomienda un aceite

industrial monogrado ISO 46 de base tipo II para extender los periodos de cambio y alargar la vida útil de la bomba.

Figura 2. bomba para vacío.



Figura 3. Vista frontal bomba para vacío.



- **Aumento de presión:** Se realiza con un compresor de una etapa marca UNO AIR automático, de trabajo pesado tipo industrial. El cabezote tiene un pistón en línea con tres anillos (dos de compresión y uno barredor de aceite). Consta de canales de ventilación, manómetro, válvula de seguridad. Con registro de salida de 100 libras y tanque con capacidad de 13 gls de almacenamiento alcanza una máxima presión de 80 psi. Tiene un motor marca KTC de 1/2 HP a 1730 rpm con

potencia de 0,37 Kw montado sobre rodamientos y una válvula proporcional de 4 a 20 mA con rango de 0,5 a 10 bar.

Para la lubricación de este equipo se recomienda aceite para motor monogrado SAE 40 sin detergentes.

Figura 4. Compresor.



Variaciones de Temperatura.

- **Incremento de Temperatura:** Se logra con el calentamiento de dos resistencias tubulares rectas de igual longitud sostenidas en las paredes laterales.
- **Refrigeración:** Se realiza con un congelador de aire forzado de 17 pies³ de capacidad y motor de 1/3 HP. La estructura mide de frente 1,80 m, fondo 0,70 m y alto 0,80 m. La temperatura mínima es de -5°C teniendo en cuenta que desde la temperatura ambiente se demora aproximadamente 60 minutos en alcanzarla. Contiene paredes con aislamiento en poliuretano inyectado a máquina con densidad 35 Kg/m³ y 4 cm de espesor. Acabados interior y exterior en lámina galvanizada calibre 24 con Pintura a base de poliuretano, aplicada con base acrílica.

Variaciones de Humedad.

- **Humidificador:** El sistema de suministro de humedad esta

dado en conexión de sifón ya que el depósito de líquido se encuentra en el fondo de la cámara. La aspersión se hace con una boquilla en bronce niquelado atomizadora de aire con capacidad de 0,49 a 280 l/h y un conjunto de aspersión SUF1 que es el variador para obtener las diferentes condiciones de Humedad, además de un regulador de presión.

- Filtro: Se tiene un filtro manual para drenaje de caudal aproximado de 23,58 l/s a 6,9 atm. Este es para eliminar los contaminantes sólidos y líquidos de las líneas de aire protegiendo el equipo de los efectos corrosivos de las simulaciones.

Figura 5. Sistema de Aspersión con suministro de líquido por sifón.

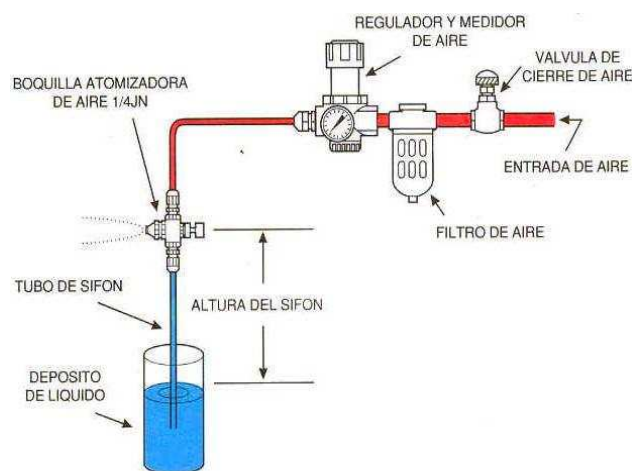


Figura 6. Depósito del humidificador y boquilla de Aspersión.



Otros.

- Válvula Solenoide: Es una electroválvula modelo 11438-20 de dos vías normalmente cerrada para líneas neumáticas e hidráulicas de 110-120 voltios y 50/60Hz.
- Medidor de presión: Es un manómetro modelo 26383-1/4-60 análogo con precisión de más o menos 2% a mitad de escala y 3% en los extremos de esta y de unidades en bar y psi.
- Ventilador: Se cuenta con un pequeño ventilador de 10cm X 10cm marca SUN referencia SP200A, de 115V AC y 50/60Hz de frecuencia a 0.21 A. Este ayuda en la simulación de los diferentes ambientes ya sea para hacerlos más homogéneos o como catalizador en las variaciones de las condiciones.

Figura 7. Ventilador



2.2. SISTEMA DE CONTROL

- **Sensor de Temperatura y humedad relativa:** Es un transmisor Marca Rixxen modelo THR 300 con salida de 4 a 20 mA, longitud de bulbo 6cm, longitud del sensor de 50mm. Para medir la humedad el principio es capacitivo y para la temperatura es PT100A.

Figura 8. Sensor de temperatura y humedad relativa.



- **Sensor de Presión:** Es un transmisor de la serie PTB 100A de barómetros análogos marca Vaisala. Los rangos de operación que maneja son entre -40 y 60°C , en un ambiente de humedad de NO condensación y mide desde 800 hasta 1060 hPa.

Figura 9. Sensor de Presión.



- **Controladores:** Para esta aplicación se utilizaron los reguladores de procesos programables CAL Controls 9500P, los cuales convierten la entrada lineal de 4-20mA de corriente en voltaje mediante el uso de un resistor interno.

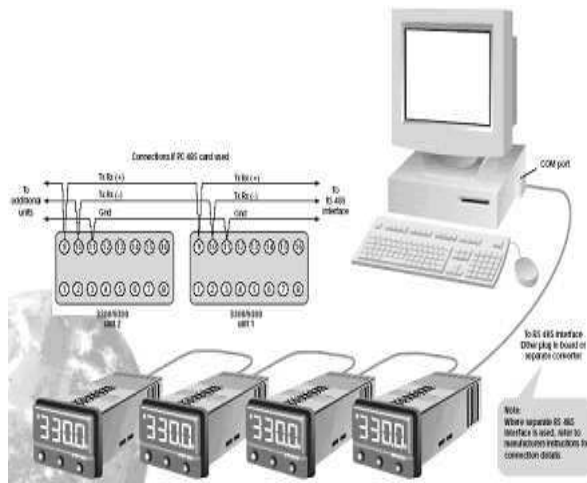
Figura 10. CAL control 9500P.



- **Comunicación:** La conexión y transferencia de datos se da por la utilización de un protocolo de comunicación MODBUS RTU donde a la señal de voltaje diferencial leída por la conexión RS232 es

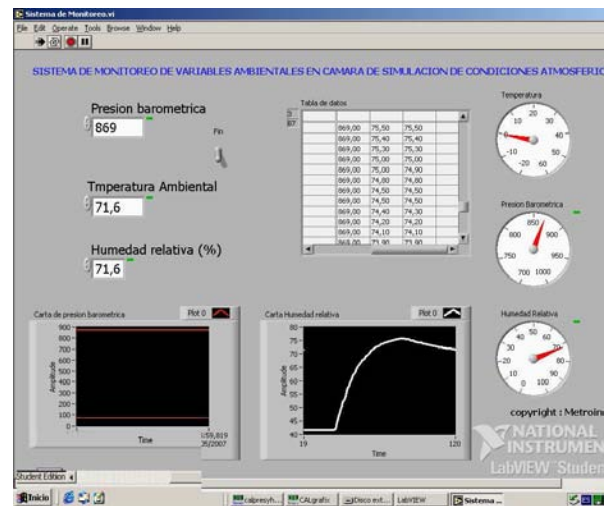
convertida a RS485 para ser identificada por el Host del PC a una distancia de hasta 1200 metros.

Figura 11. Comunicación serial RS485.



- **Software:** Para crear un registro y adquisición de datos mediante el sistema CAL controls, es necesario utilizar el software CalGraphix profesional y el Labview student versión 7,0, como herramientas para visualización del proceso. Este es un software gráfico basado en Windows, designado para la supervisión por PC de los controladores de modelo CAL 3300 y 9300. Brinda autoajuste en las variables de control (PID), y ofrece la capacidad de ajuste remoto, configuración del instrumento, clonar, salvar y recuperar los parámetros del instrumento de los archivos, junto con la carga y parametrización en tiempo real.

Figura 12. Interfase Labview Student version 7.0.



3. ASPECTOS GENERALES

Cuando se simulan los diferentes ambientes se deben tener en cuenta los diferentes rangos de operación permitidos por cada uno de los componentes y dispositivos de la cámara:

- **Bomba de Vacío.** Presión Absoluta máxima 20 inhg. Temperatura máxima de gas aspirado 60°C.
- **Compresor.** Presión máxima de 80 psi, con válvula de 4 a 20 mA y presión de 0,5 a 10 bar.
- **Resistencias.** Calculadas para una operación de -5°C a 45°C.
- **Congelador.** Temperatura mín. -5°C. Temperatura máx. 40°C.
- **Humidificador.** Capacidad de Atomización de 0.49 a 280 L/h
- **Dispositivo de Temperatura.** Rango permitido de -20°C a 60°C.
- **Dispositivo de Humedad Relativa.** Rango permitido de 0% a 100%.
- **Dispositivo de Presión.** Rango permitido de 800 hPa hasta 1060 hPa.
- **Controladores.** Señal de entrada de 4 a 20 mA de entrada lineal.

Condiciones iniciales. Estas deben ser la referencia para cada uno de los estudios, para esta cámara son las condiciones

atmosféricas de la ciudad de Cali por ser el lugar donde se encuentra ubicado el equipo.

Tabla 1. Comandos Aéreos del Territorio Nacional.

| Departamento | Base | Sigla | Tmáx (°C) | Tmín (°C) | % H.r | Presión (hPa) |
|-----------------|-------------------------------------|---------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Cundinamarca | Comando Aéreo de Combate No. 1 | CACOM-1 | 24.9 | -6.4 | 76-77 | 752.9 |
| Meta | Comando Aéreo de Combate No. 2 | CACOM-2 | 36.2 | 15.0 | 66-83 | |
| Atlántico | Comando Aéreo de Combate No. 3 | CACOM-3 | 39.2 | 18.0 | 77-84 | 1008.2 |
| Tolima | Comando Aéreo de Combate No. 4 | CACOM-4 | 35.4 | 14.4 | 71-82 | |
| Antioquia | Comando Aéreo de Combate No. 5 | CACOM-5 | 31.1 | 10.0 | 63-73 | 850.3 |
| Caquetá | Comando Aéreo de Combate No. 6 | CACOM-6 | 39.4 | 16.0 | 81-87 | |
| Cundinamarca | Comando Aéreo de Transporte Militar | CATAM | 24.9 | -6.4 | 76-77 | 752.9 |
| Valle del Cauca | Escuela Militar de Aviación | EMAVI | 36.5 | 13.4 | 70-75 | 904.2 |
| Amazonas | Comando Unificado del Sur | CUS | 39.0 | 14.3 | 84-88 | |
| Vichada | Grupo de Combate del Oriente | GAORI | 40.0 | 18.0 | 54-73 | |
| San Andrés | Grupo Aéreo del Caribe | GACAR | 34.4 | 18.2 | 78-84 | 1010.8 |

4. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN

- Leer detenidamente el manual de operación de la cámara ambiental y seguir sus instrucciones.
- Identificar todos los componentes y demás elementos involucrados con la funcionabilidad de la cámara.
- Conocer y tener siempre en cuenta los rangos de operación permitidos para cada dispositivo.
- Verificar que todos los componentes estén conectados.
- Encender la cámara. El interruptor se encuentra ubicado en la parte posterior del panel de controladores.
- Encender el PC.
- Esperar a que la cámara registre las condiciones del medio ambiente actual, hacer esto con las compuertas abiertas, cuando los controladores estén estables cerrar la cámara y anotar los datos que estos muestran en sus pantallas como condiciones iniciales de la prueba.
- Iniciar el Software:

- 1) En la pantalla del escritorio hay 3 iconos (CalSever, CalGraphix y Labview).
- 2) Haga un doble Click en Cal Server.
- 3) Vaya a la barra de herramientas a Add.(señale Auto detect devices)
- 4) Aparece la pantalla Select Comms port.
- 5) Add port y seleccione COM1. Coloque en Modbus Address 5.
- 6) Verifique que el setup este configurado baud rate: 9600, Parity: None, Stop Bits 1, Time out: 1000, Transaction Gap: 20 y dar OK.
- 7) Dar siguiente (el sistema hace un Scaneo y genera en la pantalla "new devices Found") los equipos que ha detectado. (Dar clic en finalizar)
- 8) Aparece en la pantalla principal del CALserver los equipos detectados.
- 9) Si desea puede guardar esta Configuración en File...SAVE AS... para no volver a realizar los pasos Anteriores.
- 10) Minimizar el Cal Server.
- 11) Abrir el CALgraphix el cual actúa como Cliente del Cal Server.
- 12) Vaya al icono de "New instrument". Aparece la pantalla "Select devices" y en la parte de abajo notara que están los equipos que usted creo en el Cal Server.
- 13) Seleccione cada uno de los ítems dando un clic en la tecla "Aceptar".
- 14) Haga el paso 13 para cada uno de los equipos del sistema.
- 15) Ya debe aparecer en pantalla los dispositivos o instrumentos virtuales en la pantalla del PC

monitoreando los equipos reales en tiempo Real.

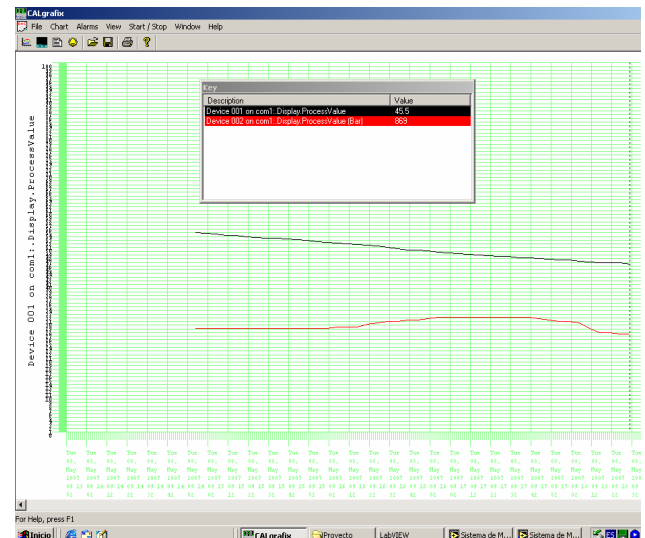
Figura 13. Interfase del CalGraphix.



- Cree un registro (carta virtual) de la prueba:
 - 1) Estando en el CalGraphix vaya al icono de carta dentro de la barra de herramientas.
 - 2) Aparece una ventana Chart properties. Defina un nombre de archivo, una distancia un tiempo de intervalo, "sample frecuencia" y un "update chart after". De un clic en siguiente. Ver Registro de Datos-Carta virtual.
 - 3) Aparece la pantalla "chart trace selection" y dar click en la pestaña Add (adicionar). Seleccionar el dispositivo ejemplo: device 001 on com.
 - 4) Dar click en display y posteriormente en "process value". Note que aparece ya adicionado el dispositivo en la pantalla.
 - 5) Haga lo mismo para cada uno de los dispositivos. Debe definir una escala (valor máximo y mínimo) con una división de escala asociada. Ver Registro de datos-Carta Virtual.

- 6) Cuando se definan todos los instrumentos de un click en siguiente para definir Formatos de fecha y Hora y los colores de fondo de la pantalla y de la grilla.
- 7) Al dar aceptar ya aparece el registro en carta.

Figura 14. Carta Virtual.



- 8) Con click derecho en cualquier parte de la carta usted puede realizar varias funciones:
 - a) Escribir una nota ante un evento determinado.(Add note)
 - b) Ver una nota anterior con "show notes".
 - c) Ver los valores numéricos con"Key".
 - d) Realizar una parada o un arranque de registro con "Start/Stop".
- 9) Para exportar los datos a Excel vaya a File..Export...chart (dele un nombre o ruta al archivo donde desee que exporte los datos.).
- 10) Para salvar la carta de un registro vaya a File...Save as y salve el archivo con un nombre determinado.(observe que es un .TRC).
- 11) Puede abrir las cartas anteriores en cualquier momento.

12) Se sugiere guardar las cartas con un nombre ascendente de fácil recordación (ejemplo: semana de año, consecutivo interno, mensual, semanal, diario, etc.) de acuerdo al formato que mas se acomode a su interpretación.

- Introduzca en la cámara la probeta del material de estudio debidamente identificada. Remítase a la sección *Registro de Datos* de este manual para la debida marcación de las probetas.
- Empiece a lograr las condiciones deseadas de temperatura, Humedad relativa y presión mediante la operación de los diferentes elementos de la cámara (resistencias, humidificador, bomba de vacío, etc). **Tener siempre en cuenta no superar los límites de los rangos de operación de cada uno de los componentes.** Ver sección de *Aspectos Generales*.
- Cuando halla logrado obtener y mantener (controladores estables por más de 5 minutos), las condiciones ambientales de la base deseada, remítase al PC desde donde ahora en adelante podrá controlar y monitorear todo el periodo de exposición de la prueba.
- Una vez terminada la exposición, grabar e imprimir la carta virtual. No olvide apagar y desconectar todos los equipos.

5. REGISTRO DE DATOS

El éxito de todo estudio es consignar el conocimiento adquirido para posteriores consultas, por lo tanto uno de los propósitos de la utilización de esta cámara es

llevar al operario a registrar sus simulaciones para aportar a la adecuada consecución de una base de datos, esto con el fin de tener material de consulta y estudio en las labores de mantenimiento.

A continuación se explica la importancia de marcar apropiadamente las probetas y como tener registro de todas las simulaciones que se efectúen con la cámara.

5.1. MARCACIÓN DE PROBETAS

Es importante que antes de exponer las probetas a la cámara estas estén bien identificadas con los datos del tipo de material, las condiciones ambientales a las que serán sometidas y el tiempo de exposición. La nomenclatura a seguir para cumplir con estos requisitos es por ejemplo:

AL2024/CACOM1/XXXh

Donde:

- AL2024 es el material Aleación de Aluminio
- CACOM1 son las condiciones ambientales de Cundinamarca
- XXXh son las horas de exposición de la probeta a la cámara.

5.2. CARTAS VIRTUALES

Igualmente es importante tener el registro del comportamiento de las variables durante toda la simulación, para ello las cartas virtuales deben ser formateadas de manera que cada centímetro equivalga a 10 minutos y que cada minuto se tome una muestra, por ende que cada centímetro sea la visualización de 10 muestras. Con esto en un día de exposición continua en la cámara se tendrían 144 cm de graficación de las variables

equivalentes a las 24 horas de simulación.

Estas cartas deben ser archivadas en la carpeta Simulaciones Cámara Ambiental para su fácil consulta y con los nombres de la probeta, ejemplo:

Nombre archivo:

AL2024CACOM1XXXh

Ubicación archivo: escritorio/
Cámara Ambiental/ Simulaciones.

Los datos de Fecha y hora de las exposiciones no son necesarios de indicar en el nombre del archivo, pues, en el formato de la carta estos aparecen durante todo el periodo de simulación.

6. MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

Para el óptimo desempeño y durabilidad de la cámara es necesario tener claro que todos los procedimientos de mantenimiento y calibración se deben hacer con la herramienta y repuestos originales indicados, es importante también que al realizar cualquier revisión los equipos estén desconectados. Los equipos no deben quedar ubicados en áreas del laboratorio expuestas al polvo o a la humedad.

Bomba para Vacío. Los rodamientos y retenedores deben ser sustituidos cada 2 años o 2000 horas de trabajo, lo que se de primero. Los filtros (desfogues y lubricación) cuando presenten obstrucciones deben retirarse y lavarse. Revise la alineación del montaje cuando varíe las conexiones o tubería. **En caso de admisión de cuerpos extraños NO opere la bomba.** Si disminuye el vacío o la bomba se calienta retire los filtros y cámbielos.

Compresor. Si utiliza una extensión para operar el

compresor verifique que sea el cable o toma correcto para el amperaje del motor. El automático y la válvula están técnicamente calibrados, NO los altere. Una vez encendido regule la salida de presión a su conveniencia, con frecuencia revise el nivel de aceite manteniendo lubricado el cabezote. Limpie el filtro de entrada de aire mínimo dos veces al mes, revise la válvula de seguridad para verificar que no este obstruida antes de operar el equipo.

Cámara. Es importante que la cámara permanezca cerrada para evitar la admisión de partículas extrañas, revise antes de operarla que este limpia y seca. Es de vital importancia que sifón que tiene en el fondo la maquina permanezca libre de polvo y partículas, pues este es la conexión a succión de la bomba para vacío. Este atento a no ubicar ningún elemento cerca de las resistencias. Cuando este operando la cámara, encienda la luz fluorescente para que este atento a cualquier irregularidad en el interior de esta.

CAL controls. Los controladores deben estar programados siempre con el tipo de sensor, La unidad de medida y el dispositivo de salida. Para manejar la configuración de los controladores se debe tener claro el uso de los tres botones: Asterisco, Abajo, Arriba, usted puede recorrer los niveles (**LEUL**) o las funciones (**inPut, none...**) operando estos adecuadamente. Por ejemplo para realizar la entrada de ajustes iniciales (donde puede seleccionar las unidades de medida) usted debe escoger el **LEUL2** (presione Asterisco y abajo juntos hasta

que llegue al nivel deseado) luego suelte los botones y empiece a buscar con Arriba o Abajo la función deseada **unit**, cuando este aquí con los botones Arriba, Abajo busque las unidades respectivas a la medición.

En el nivel A **LEUL A** hay dos funciones que no deben ser modificadas estas son **hi.in** y **Lo.in** de valores 50 y 10 respectivamente, pues son ajustes de fábrica de valores de entrada.

Para mayor información acerca de las diferentes funciones y niveles remítase al Manual del Usuario del CAL Control página 3 de la versión en español.

La forma de la conexión eléctrica de los controladores a los sensores esta explícita en los planos. Ver Anexo 1.

Sensores. Para la adecuada exactitud y operación de ambos sensores es recomendable hacer una calibración anual o cuando esta sea necesaria. Para el sensor de temperatura y humedad relativa esta debe hacerse con un patrón primario por comparación. Para el sensor de presión se recomienda llamar al proveedor del equipo ya que esta se realiza por comparación con un sensor estándar de fábrica que cumple con las recomendaciones del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, USA) y el Laboratorio de Estándares y Medidas (MSL) de Vaisala acreditado por la norma de estándares ISO/IEC 17025.

6.1. LUBRICACIÓN

La lubricación es el uno de los principales elementos del mantenimiento, de la calidad de los aceites que se utilicen depende la vida útil del equipo y sus componentes. Es por esto, que para el óptimo desempeño de

la bomba para vacío y el compresor se recomienda la utilización de una marca que cumpla con las normas ISO, SAE y API respectivas de la Industria y el sector Automotriz.

Para el caso de la Bomba el aceite hay que reemplazarlo por lo general cada 500 horas de trabajo o cuando pierda viscosidad (empiece a tener una apariencia lechosa), el nivel siempre debe mantenerse en el centro de la mirilla, si es necesario rellenar debe identificar cual es la causa de la pérdida o consumo de aceite; esta puede ser el sistema de sellamiento, el equipo utiliza para esto dos retenedores de labio REF: 50-120 que deben ser reemplazados cada 2000 horas de trabajo. La capacidad del carter es de 1.6 galones, este debe ser desmontado y lavado cada dos años. El aceite recomendado es el **Chevron Rykon Olis AW ISO 46** y el periodo de drenaje recomendado para la calidad de este supera considerablemente a los demás del mercado, pues por ser un lubricante de base tipo II su cambio puede ser extendido hasta las 3000 horas de trabajo. Los rodamientos son autolubricados y deben estar sellados, cuando se pierda alguno de estos sellos debe reemplazarse.

Para el compresor que cuenta con un pistón en línea, se maneja una lubricación de motor automotriz definida por la adecuada viscosidad y calidad del aceite. Para este es necesario utilizar un lubricante monogrado SAE 40 de baja calidad API sin detergencia. El aceite recomendado es un **Supermoto 4T SAE 40 API SF/CC** con periodo de

drenaje cada 500 horas de trabajo.

Usted puede encontrar las fichas técnicas de los aceites aquí recomendados en este manual. Ver anexo 2.

7. SEGURIDAD

El operario de la cámara debe tener conocimiento del funcionamiento y los rangos de operación permitidos de esta y cada uno de sus componentes, verificar las conexiones eléctricas de todos los equipos y haber leído el manual de instrucciones antes de colocar la cámara en funcionamiento.

No es recomendable dejar la cámara funcionando sin la supervisión de un operario, esta labor puede ser efectuada desde el computador. Al terminar las labores con la cámara todos los equipos deben ser apagados y desconectados.

Anexo 2. Paper

ESTUDIO DE CORROSIÓN EN PIELES Y ESTRUCTURAS AERONÁUTICAS

María Carolina Serna Mosquera

*Universidad Autónoma de Occidente,
mserna@eduardono.com, Cali.*

Abstract: Un gran problema que enfrenta el sector aeronáutico y en particular la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), es la corrosión en los componentes de sus aeronaves especialmente pieles, estructuras y quincallería (tornillos, remaches, etc.) por efectos del medio ambiente al que están expuestos al recorrer el Territorio Nacional. Influye además la antigüedad de la flota, pues, algunas aeronaves poseen más de cincuenta (50) años de servicio por lo que presentan problemas corrosivos acumulados por los años de operación. Por lo anterior se hace imprescindible la implementación de un programa de mantenimiento real ajustado a las condiciones actuales de operación y antigüedad del parque aeronáutico de la FAC, el cual se hace viable y real a través de este estudio basado en la realización de pruebas con la puesta a punto de una cámara ambiental.

Keywords: Corrosión, cámara ambiental, aeronaves, variables ambientales, aluminios, simulación, aleaciones, puesta a punto, mantenimiento predictivo.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de corrosión latente en la FAC catalizador del deterioro en las aeronaves y que constantemente esta afectando la disponibilidad y operación de la flota, es el factor que generó que el Centro de Investigaciones en Tecnologías Aeronáuticas (CITA), desarrollara y colocara a disposición de la FAC la cámara ambiental como herramienta de mantenimiento predictivo y solución al problema.

El desarrollo del presente estudio involucró la puesta a punto de la cámara ambiental del CITA, proceso en el cual se terminaron de hacer las conexiones de todos sus componentes, la configuración de los sensores y controladores, la comunicación con el

software para poder tenerla al servicio del estudio. Con la utilización de la cámara se logra el estudio y análisis de la acción y causas de la corrosión en las diferentes aleaciones a través del sometimiento de las probetas a ensayos bajo condiciones conocidas reproducibles, permitiendo así tomar medidas predictivas y haciendo un aporte significativo a las prácticas actuales de mantenimiento en la FAC.

La cámara tiene la característica de estar al alcance de cualquier técnico, operario o ingeniero que necesite de sus servicios gracias al manual paso

a paso que se elaboró en este trabajo para lograr una operación sencilla y optima del equipo.

2. INVESTIGACIÓN

2.1. Corrosión atmosférica.

La corrosión atmosférica puede ser definida como el desgaste sufrido por los diferentes materiales al estar expuestos al aire y sus poluciones. La severidad de la corrosión atmosférica tiende a variar significativamente a lo largo de las diferentes localidades geográficas, e históricamente ha sido costumbre clasificar los ambientes como rural, urbano, industrial, marino o las combinaciones de estos.

Un requerimiento fundamental para el proceso de corrosión electroquímico es la presencia de un medio electrolítico. Cuando se tienen superficies metálicas expuestas a condiciones atmosféricas, se crea una delgada película invisible de electrolitos al alcanzar un nivel critico de humedad; por ejemplo para el caso del hierro la humedad critica es del 60% en una atmósfera libre de Dióxido de Sulfuro. Cuando un material por su exposición al ambiente forma una delgada película invisible de electrolitos se dará paso a la corrosión atmosférica por medio del balanceamiento de reacciones anódicas y catódicas.

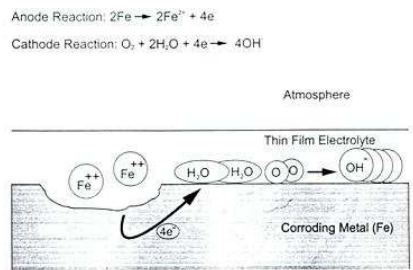


Fig. 1. Corrosión atmosférica del hierro.

Las diferentes formas de corrosión (figura 2) categorizan este fenómeno de acuerdo a su apariencia para ello se dividen en tres grupos.

Grupo No 1: fácilmente identificable por un examen visual ordinario.

Grupo No 2: requieren formas suplementarias de examinación.

Grupo No 3: su verificación requiere el uso de microscopia (óptica, electrónica, etc).

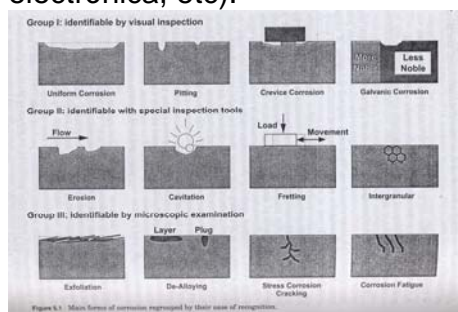


Fig. 2. Formas de corrosión.

3. CÁMARA AMBIENTAL

La cámara ambiental es una herramienta del mantenimiento predictivo que mediante la simulación de las diferentes condiciones

atmosféricas logra recrear el ambiente real al que están expuestas las pieles y estructuras de las aeronaves. Con la exposición de piezas y componentes hechos con diferentes materiales y aleaciones a un ambiente controlado se puede estudiar el curso natural de la corrosión y sus efectos en dichos elementos.

La cámara esta en capacidad de imitar variables ambientales como temperatura, presión y humedad relativa, y con la variación de estas simular los ambientes de los diferentes lugares geográficos donde operan las aeronaves de la FAC. Las condiciones ambientales de las bases están descritas en la tabla 1.

El funcionamiento de la cámara ambiental esta constantemente monitoreado por un software de visualización en tiempo real, así de manera continua durante las simulaciones efectuadas todas las variables están siendo controladas y registradas.

La cámara esta dividida en dos sistemas, la bomba de vacío, el compresor, el humidificador, un ventilador, dos resistencias y el congelador son componentes del sistema de simulación; los sensores de temperatura, humedad relativa, presión, los controladores y todo lo correspondiente a la comunicación de la cámara con el computador y el software mismo son componentes del sistema de control

Tabla 1. Comandos Aéreos del Territorio Nacional.

| Departamento | Base | Sigla | T _{máx} (°C) | T _{mín} (°C) | % H.R | Presión (hPa) |
|-----------------|-------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-------|---------------|
| Cundinamarca | Comando Aéreo de Combate No. 1 | CACOM-1 | 24.9 | -6.4 | 76-77 | 752.9 |
| Meta | Comando Aéreo de Combate No. 2 | CACOM-2 | 36.2 | 15.0 | 66-83 | |
| Atlántico | Comando Aéreo de Combate No. 3 | CACOM-3 | 39.2 | 18.0 | 77-84 | 1008.2 |
| Tolima | Comando Aéreo de Combate No. 4 | CACOM-4 | 35.4 | 14.4 | 71-82 | |
| Antioquia | Comando Aéreo de Combate No. 5 | CACOM-5 | 31.1 | 10.0 | 63-73 | 850.3 |
| Cauquetá | Comando Aéreo de Combate No. 6 | CACOM-6 | 39.4 | 16.0 | 81-87 | |
| Cundinamarca | Comando Aéreo de Transporte Militar | CATAM | 24.9 | -6.4 | 76-77 | 752.9 |
| Valle del Cauca | Escuela Militar de Aviación | EMAVI | 36.5 | 13.4 | 70-78 | 904.2 |
| Amazonas | Comando Unificado del Sur | CUS | 39.0 | 14.3 | 84-88 | |
| Vichada | Grupo de Combate del Oriente | GAORI | 40.0 | 18.0 | 54-79 | |
| San Andrés | Grupo Aéreo del Caribe | GACAR | 34.4 | 18.2 | 78-84 | 1010.8 |

3.1. Puesta a punto.

La puesta a punto comienza con la verificación del funcionamiento de cada uno de los componentes: al interior de la cámara la lámpara de luz fluorescente, el ventilador, el congelador y las resistencias funcionan perfectamente, todos tienen su respectivo interruptor en el panel de control de la cámara; los sensores de Presión y Temperatura – Humedad Relativa se encuentran también ubicados en el interior de la cámara pero desconectados. El panel de control sólo cuenta con un CAL Controls, el superior correspondiente a la temperatura. No hay software instalado, ni computador para operar

la cámara. Para los equipos exteriores la bomba de vacío se encuentra conectada y funcionando a diferencia del compresor que no tiene conexión con el humidificador.

El paso siguiente fue la parte de control, la instalación de los dos controladores faltantes para las variables de presión y humedad relativa, la conexión de estos a sus respectivos sensores, el montaje del protocolo de comunicación de la cámara con el computador y la instalación de un software para monitoreo de las simulaciones, quedando la cámara tomando registro de temperaturas, presiones y porcentaje de humedad relativa del ambiente y mostrándolas en tiempo real el computador.

Con la cámara alistada se empiezan a correr simulaciones de prueba, esto para dar visto bueno al funcionamiento de la cámara; en este proceso se detectan varios errores. El primero de ellos aparece un día de mediciones cuando la humedad

relativa después de estar simulando ambientes muy fríos y luego muy calientes se dispara por encima de un increíble 300%. Con la variación de estas mismas condiciones se opera la cámara tratando de mermar este indicador sin obtener resultados, finalmente el equipo es apagado. Otro día de pruebas la cámara se encuentra midiendo otra vez dentro de los rangos normales, esta vez simulando ambientes de temperaturas altas como el caso de la base ubicada en el departamento del Atlántico y se presenta otro inconveniente, esta vez, antes de alcanzar los 40°C de temperatura el recubrimiento interior de las compuertas de la cámara en poliuretano inyectado de 35Kg/m³ y 4cm de espesor se ampolla por efectos del calor interior. Este imprevisto obliga a apagar las resistencias y abrir las compuertas para liberar calor, posterior a esto se dispara nuevamente la humedad relativa por encima del 600%.

Con este último suceso se comprueba que no se tiene una adecuada operación de la cámara y se sospecha inicialmente del mal funcionamiento de los sensores en este caso el Rixxen, ya que, específicamente el caso de la pérdida de propiedades del poliuretano por efectos de una temperatura de 40°C, no es normal. Basados en el concepto anterior se sospecha entonces que la temperatura real en ese momento de prueba debía ser mucho mayor a los 40°C reportados por el controlador. Esta hipótesis se basa en que son precisamente las mediciones de temperatura y porcentaje de humedad relativa correspondientes a un solo dispositivo las que están fallando.

Se inicia una evaluación del ciclo completo de funcionamiento sensores – controladores -software para detectar que parte del sistema de captura de datos es la que está fallando. Primero se analiza la operación del sensor Rixxen, se revisan conexiones y respuesta a las

variaciones. Posteriormente se destapa el panel de control para verificar las conexiones de los sensores con los CAL controls, donde se encuentran una serie de inconsistencias. Con la seguida interpretación del manual de los controladores se detecta que estos no son compatibles con la tecnología del Rixxen. No había una medición real susceptible a las variaciones que el medio presentaba. Esta situación engañosa de lectura se tenía tanto con el controlador de temperatura como con el de porcentaje de humedad relativa respectivas al trabajo del dispositivo Rixxen, quien de fabrica viene para ser conectado al lector como una PT100 en humedad relativa a diferencia del controlador que recibe la señal como termopar.

La solución que se toma por motivos de tiempo perdido es sustituir temporalmente el sensor Rixxen que en un solo dispositivo medía inicialmente temperatura y porcentaje de humedad relativa por una

termocupla para la temperatura y un dispositivo artesanal que nos ayude con la humedad, mientras se logra hacer la adecuada conexión del Rixxen.

Otro inconveniente fue la comunicación RS al computador, pues el dato de temperatura nunca fue leído por el software, por lo que se procedió entonces a identificar la falla: un convertidor innecesario.

Es así como superados los inconvenientes anteriormente descritos, la cámara ambiental (figura 3) se entrega al CITA en perfecto estado de funcionamiento de todos sus componentes y en la capacidad de mantener ambientes controlados.

Como valor adicional agregado a la tecnología con la que se recibió la cámara, se obtuvo la automatización, con la cual no se contaba en un inicio, haciendo por ejemplo que los dispositivos se desconecten solos al alcanzar ciertos valores límites permitidos.



Fig.3. Cámara ambiental.

Se entrega también un manual para la correcta manipulación del equipo donde se indica paso a paso la operación de la cámara para que esta pueda ser accesible a todo el personal de mantenimiento de la FAC, quedando pendiente las corridas de prueba con las probetas de aleación de aluminio que se completarán seguidas a la entrega del trabajo. Adicional en el proyecto se orienta a la óptima utilización de la cámara y en conjunto con los demás equipos del laboratorio del CITA, a las tareas de mantenimiento de la FAC, incentivando a la formación de

una base de datos para implementar una ideología de técnicas predictivas en mantenimiento. Para esto se entrega también un formato de ficha técnica de mantenimiento donde se enseña a realizar un estudio científico que lleve al oportuno análisis de las causas de las fallas en eventualidades aeronáuticas, logrando con esto un aporte significativo a la operación de las aeronaves y seguridad de sus tripulantes.

4. CONCLUSIONES

Con el perfeccionamiento y la puesta en marcha del proyecto “Cámara Ambiental”, se logra una contribución científica y tecnológica al desarrollo de estudios en componentes aeronáuticos afectados por corrosión, especialmente en estructuras, pieles y quincallería de las aeronaves fortalecimiento así el área de mantenimiento en la FAC.

Con sólo la lectura del manual de operación que describe de manera

ordenada los pasos que se requieren para lograr un óptimo funcionamiento de la cámara y que por ende asegura la disponibilidad para todos los interesados en realizar este tipo de estudios, se logra la finalidad del proyecto al poner a disposición de la FAC la Cámara Ambiental, como el aporte de una herramienta de fácil manipulación, útil en las prácticas

actuales del mantenimiento aeronáutico.

REFERENCIAS

ROBERGE, Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. Ed. McGraw-Hill Handbook. 2000.

Handbook of Case Histories in Failures Analysis. Volumen 1. ASM International.1992.

Handbook of Case Histories in Failures Analysis. Volumen 1. ASM International.1993.